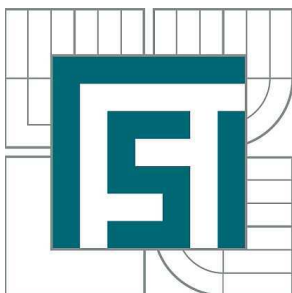


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VALIDACE NUMERICKÉ SIMULACE PRŮBĚHU PLNĚNÍ MATEČNÉ FORMY VOSKEM A JEJÍ NÁSLEDNÁ OPTIMALIZACE

VALIDATION OF NUMERICAL SIMULATION OF WAX FILLING INTO MOTHER DIE FOLLOWED  
BY ITS OPTIMIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ŠTĚPÁN BOCHNÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/13

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Štěpán Bochníček

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Validace numerické simulace průběhu plnění matečné formy voskem a její následná optimalizace**

v anglickém jazyce:

### **Validation of numerical simulation of wax filling into mother die followed by its optimization**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Numerické simulace se dnes běžně používají při optimalizaci slévárenských technologií. Využívají se jak při aplikaci trvalých (kovových), tak netrvalých (pískových) forem a to prakticky ve všech fázích zhotovení odlitku (při výrobě forem a jader, plnění dutiny formy kovem a jeho následném tuhnutí a chladnutí). Nicméně zatím nejsou zcela využity možnosti numerických simulací při zhotovení odlitků metodou vytavitelného modelu (především při zhotovení voskového modelu, který je primárním předpokladem pro vznik dokonalého odlitku). Přitom existuje několik výpočetních programů, které by po příslušných úpravách mohly být s úspěchem v technologii vytavitelného modelu použity. Tematika této práce je součástí řešení vědecko-výzkumného projektu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje ALFA - TA01010766 „Výzkum a vývoj technologie výroby rozměrných, tenkostěnných a vysoce jakostních odlitků z Al slitin“.

Cíle diplomové práce:

Ověřit a následně vyhodnotit numerickou simulaci na testovací formě v programu Cadmould.

Seznam odborné literatury:

1. BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
2. DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., aj. Výroba přesných odlitků. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
3. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.
4. HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. In: Proceedings of the World Technical Forum. Česká slévárenská společnost, Brno, 1.- 3.6.2009.
5. HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Capabilities of Investment Casting Technology – Zmožnosti tehnologije precizijskega litja. Livarski Vestnik. Duben 2006, vol. 54, no. 4, p. 175-186. ISSN 0024-5135.
6. HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets. Foundry Trade Journal. 2007, vol. 180, no. 3641, p. 32-35. ISSN 1758-9789.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 19.11.2012



  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## ABSTRAKT

Hlavním tématem diplomové práce je problematika simulace plnění matečné kovové formy voskem. Znalost zaplňování formy voskovou směsí je nezbytným předpokladem pro správnou volbu vtokového systému při zhotovení voskového modelu a také stanovení optimálních parametrů vstřikování vosku do formy (teplota, tlak, rychlost plnění).

### Klíčová slova

vytavitelný model, přesné lití, vosková směs, simulace plnění matečné formy voskem

## ABSTRACT

The main topic of the diploma thesis is simulation of the process when wax is filling the cavity of the "mother" metal die. This knowledge is the necessary presumption for correct design of the gating system and setting correct injection parameters (temperature, pressure, wax flow) when making wax patterns.

### Key words

lost-wax process, investment casting, wax mixtures, simulation of die filling by wax

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOCHNÍČEK, Štěpán *Validace numerické simulace průběhu plnění matečné formy voskem a její následná optimalizace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. s93. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Validace numerické simulace průběhu plnění matečné formy voskem a její následná optimalizace vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 23.5.2013

.....

Štěpán Bochníček

## **Poděkování**

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále také děkuji Ing. et Ing. Vojtěchu Kosourovi za pomoc při měření v praktické části práce.

**OBSAH**

Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod .....	8
1 Teoretická část.....	9
1.1 Technologie vytavitelného modelu.....	9
1.1.1 Zhotovení voskového modelu .....	9
1.1.2 Sestavení voskových modelů.....	9
1.1.3 Obalování modelů .....	10
1.1.4 Sušení .....	11
1.1.5 Vytavování modelové hmoty .....	11
1.1.6 Žihání skořepiny .....	12
1.1.7 Odlévání.....	12
1.1.8 Ostatní operace .....	12
1.2 Voskové směsi .....	14
1.2.1 Druhy voskových směsí .....	14
1.2.2 Základní složky voskových směsí .....	17
1.2.3 Vlastnosti voskových směsí.....	20
1.3 Numerická simulace .....	21
1.3.1 Simulační software CADMOULD 3D-F.....	21
1.3.2 Získání materiálových dat voskové směsi .....	30
1.3.3 Testovací forma I.....	30
1.3.4 Testovací forma II.....	32
2 Praktická část .....	34
2.1 Měření tlaku v testovací formě II .....	35
2.1.1 Postup měření.....	35
2.1.2 Naměřená data .....	39
2.1.3 Vyhodnocení .....	40
2.1.4 Shrnutí.....	48
2.2 Záznam průběhu plnění testovací formy II .....	48

2.2.1 Postup měření.....	48
2.2.2 Podklady k validaci numerické simulace.....	49
2.2.3 Vyhodnocení .....	50
2.2.4 Shrnutí.....	56
2.3 Měření průtoku voskové směsi.....	57
2.3.1 Cíle měření.....	57
2.3.2 Experimentální měření průtoku.....	58
2.3.3 Shrnutí.....	69
2.4 Numerická simulace Testovací formy II .....	70
2.4.1 Nastavení numerické simulace.....	70
2.4.2 Výsledky průběhů plnění.....	72
2.4.3 Validace numerické simulace testovací formy II .....	74
2.4.4 Shrnutí.....	78
2.5 Numerická simulace odlitku „19“ .....	79
2.5.1 Postup tvorby simulace .....	79
2.5.2 Výsledky simulací.....	82
2.5.3 Validace numerické simulace.....	85
2.5.4 Shrnutí.....	86
3 Závěr.....	87
Seznam použitých zdrojů .....	89
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	92
Seznam příloh.....	93



## ÚVOD

Technologie vytavitelného modelu nachází uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. V leteckém, automobilovém, elektrotechnickém průmyslu a v dalších oborech. Tato technologie je vyhledávána výrobci, kteří mají vysoké nároky na přesnost odlitku, kvalitu povrchu, minimální přídavky na obrábění a složitost konstrukce odlitku.

Výroba přesných odlitků je náročná na dodržení technologických postupů a kvalitu používaných materiálů. Pro dosažení vysoce přesných odlitků je důležité vyrobít kvalitní voskový model.

V dnešní době silné konkurence je důležité dosahovat co nejvyšší kvality za příznivé ceny. A to vše v co nejkratších časových intervalech a za dodržení vlastností požadovaných zákazníky. Pro zkrácení a zlevnění výrobních časů se používají nejmodernější technologie, jako je numerická simulace.

Numerická simulace je v dnešní době neodmyslitelnou součástí vývoje a výroby většiny podniků v ČR. Avšak zaměření softwarů určených pro numerickou simulaci je převážně na procesy spojené s odléváním odlitků.

V současné době není vyvinut simulační software, který by se zabýval problematikou numerické simulace výroby matečného modelu z voskové směsi. Jeho uplatnění mezi výrobci odlitků vyráběných metodou přesného lití by bylo jistě velkým přínosem pro zefektivnění výroby. Pomocí simulačního programu lze zjistit nejlepší umístění vtokové soustavy, parametry vstřikování a z výsledků případně navrhnout změnu geometrie pro odstranění vad vzniklých na matečném modelu.

## 1 TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části této diplomové práce je popsána základní problematika týkající se přesného lití, voskových směsí a tvorby numerické simulace průběhu plnění dutiny formy voskovou směsí.

### 1.1 *Technologie vytavitelného modelu*

Technologie vytavitelného modelu („na ztracený vosk“ nebo také „přesné lití“) zaujímá v dnešní době jedno z nejvýznamnějších míst moderní slévárenské technologie. Díky vývoji této technologie v posledních 50 letech se docílilo toho, že technologie je běžně zastoupena na trhu. Svoje uplatnění našla především u tvarově a rozměrově náročných odlitků, které mají vysoké nároky na materiál. [1]

Trend ve výrobě odlitků je takový, že odlitek je odléván „téměř na hotovo“ („near-net-shape“) tzn., že odlitek se dále neopracovává nebo přídavky na obrábění jsou minimální. Tím se dosáhne výrazného snížení nákladů na výrobu a zkrácení strojních časů na opracování a dokončování součástí. [1]

Technologie vytavitelného modelu se dá rozdělit na několik hlavních částí, které jsou v dalších kapitolách popsány. [1]

#### 1.1.1 Zhotovení voskového modelu

Rozhodující vliv na přesnost odlitků má kvalita voskového modelu. Voskový model může být zhotoven několika způsoby: gravitačním litím, vstřikováním za zvýšeného tlaku (0,5 – 1 MPa) nebo vstřikováním za vyššího tlaku (2,5 – 5 MPa). Matečné formy pro výrobu voskových modelů jsou většinou kovové. Vyráběné obráběním, galvanoplasticky, odléváním nebo metalizováním. [1, 2, 3]

#### 1.1.2 Sestavení voskových modelů

Modely se vyrábí jednotlivě a následně se musí připojit na vtokovou nebo nálitkovou soustavu. Drobnější voskové modely se sestavují do tzv. „stroměčků“. Jedná se o připojení více voskových modelů na společnou vtokovou soustavu. Sestavení stroměčků se může provádět nejdříve 24 hodin po zhotovení modelů, a to z důvodu jejich stabilizace. Připevnit se mohou

pomocí lepení nebo pájení. V případě pájení se voskový model přikládá na pájedlo, které je již přiloženo na vtokový kůl. Po natavení vrstvy vosku na modelu i vtokovém kůlu je pájedlo vytaženo a model se přitiskne k vtokové soustavě. V případě lepení se používá pistole, která nanáší roztavené lepidlo na spojované plochy. Tvar stromečku ovlivňuje několik faktorů: způsob připojování modelu, technologie obalování, vytavování voskové směsi, lití a oddělování odlitků. V případě, že vtoková soustava neumožní vytavování voskové směsi, je potřeba připojit výfuk k modelu. Jestliže ani výfuk nepomůže, jsou přidávány pomocné výtokové otvory. [1, 2, 3]

### **1.1.3 Obalování modelů**

Výroba keramické formy je dalším z významných faktorů, které ovlivňují velkou měrou kvalitu odlitku. Při výrobě odlitku se musí počítat se smrštěním voskové směsi, keramické formy a odlévaného materiálu. Z tohoto důvodu musí mít keramická forma dostatečnou pevnost a odolnost. [1]

Voskové modely sestavené do stromečku jsou postupně ponořovány do obalové keramické břečky. Ta je tvořena z plniva (křemenná moučka) a pojiva (alkosoly a hydrosoly). Vlastnosti keramických skořepin jsou dány především plnivem obalové hmoty. U plniva se pozoruje především: tepelná roztažnost, teplota tavení a chemická netečnost vůči kovům. Mezi žáruvzdorné materiály používané pro výrobu skořepin patří kysličníky a křemičitany. Mezi nejpoužívanější křemičitany patří mulit, zirkon, silimanit a molochit. [1, 2, 3]

Pojiva by měla mít následující vlastnosti: netečnost vůči žáruvzdornému materiálu i k roztavenému kovu během vypalování formy. Dostatečnou pevnost formy po vypálení a vysušení. Pojiva mohou být na vodní nebo lihové bázi. Vodní báze je využívána především pro primární obaly, kde je potřeba obal pomalu vysušit kvůli jeho kvalitě. Pojiva na lihové bázi mají výhodu v rychlosti sušení a vytvrzování. [1, 2, 3]

Po vytažení stromečku z obalové hmoty se nechá dostatečně okapat, aby na povrchu nebyly kapky a velké množství břečky. Po okapání se nanáší posypový materiál pomocí fluidního lože nebo sprchou. [1, 2, 3]

#### **1.1.4 Sušení**

Jednotlivé vrstvy posypu se musí důkladně vysušit. K tomu se používají klimatizované místnosti s řízenou teplotou (20 – 25 °C), vlhkostí (50 - 70%) a prouděním vzduchu. Další vrstva obalu může být nanesena pouze po dostatečném vysušení, jinak by mohlo dojít k porušení a znehodnocení stávajících vrstev obalové hmoty. Doba sušení je odlišná podle velikosti odlitku a podle použitého pojiva keramické břečky. V případě použití lihové báze pojiva a vytvrzování pomocí čpavku, lze zkrátit výrobu keramické formy na několik hodin. [1, 2, 3]

#### **1.1.5 Vytavování modelové hmoty**

Při vytavování modelové hmoty (voskové směsi) z keramické formy je důležité, aby vznikala dilatační spára. Ta umožňuje modelu dilatovat bez porušení skořepiny. Skořepina dilatuje mnohem méně a především pomaleji než voskový model a to je možný důvod znehodnocení keramické skořepiny. [1, 2, 3]

Vytavování modelové hmoty se provádí: [1]

##### **1) *Za vysoké teploty***

Forma se vloží do pece o teplotě nejméně 750°C a následně se žihá na 900-1000°C. [1]

##### **2) *Za nízké teploty***

K vytavování modelové hmoty za nízkých teplot se využívá vroucí voda, dielektrický ohřev, autokláv s přehřátou párou při tlaku 0,3-0,6Mpa a teplotě 135-165°C nebo proud teplého vzduchu směřovaný do středu voskového modelu. [1]

### 1.1.6 Žihání skořepiny

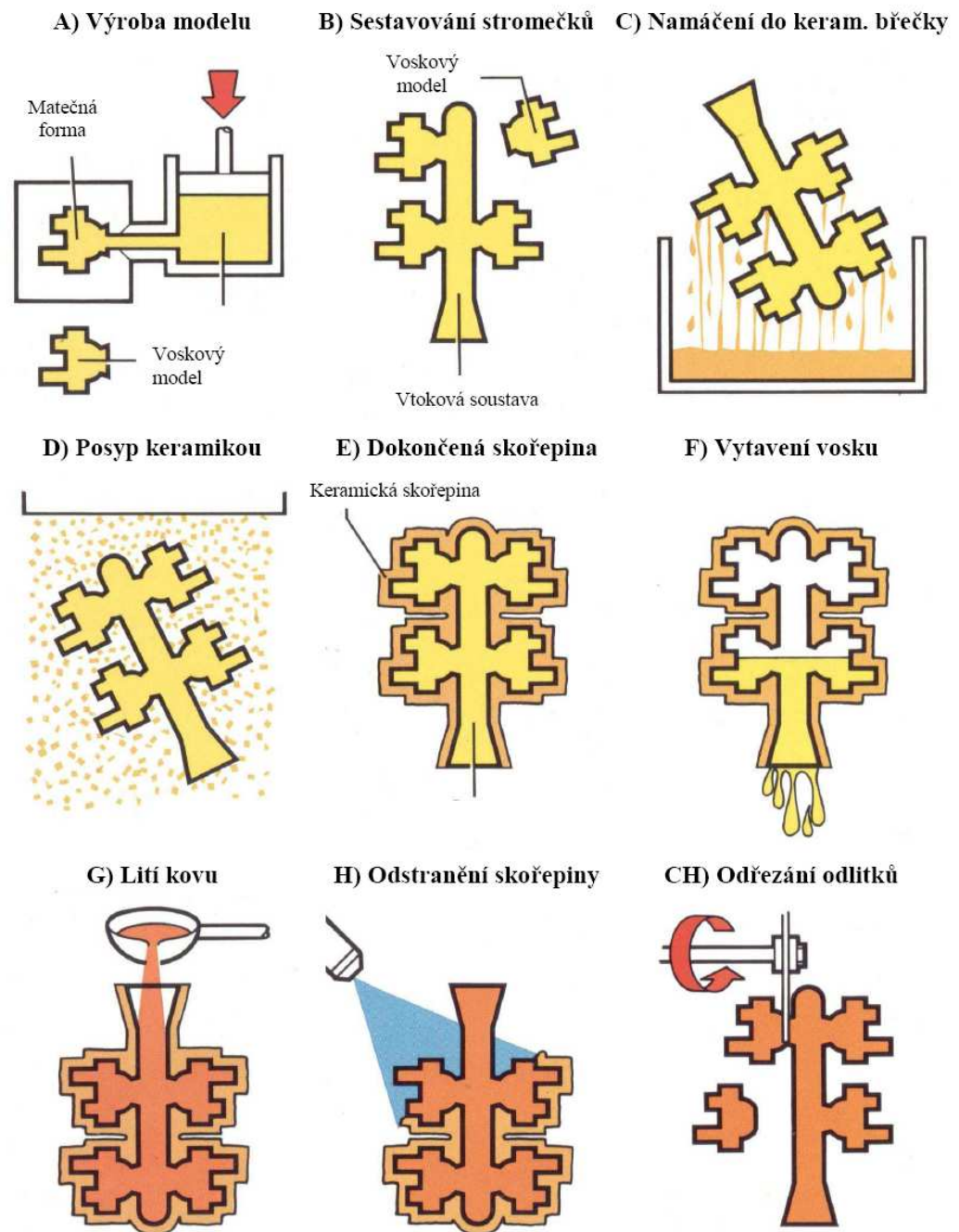
Keramické formy jsou před odléváním žihány. Žihají se z několika důvodů: odstranění zbytkové voskové směsi a těkavých látek, zhutnění keramické struktury a předehřátí formy před odléváním. Teplota žihání se pohybuje v rozmezí 900-1000°C pro SiO<sub>2</sub>. Pro molochit, korund a další jsou teploty žihání 1200-1400°C. Důvodem ohřevu keramické formy před litím je to, že dochází ke změně amorfnní vrstvy SiO<sub>2</sub> na krystalickou. V případě odlévání do studených forem by docházelo k jejich praskání. [1, 2, 3]

### 1.1.7 Odlévání

Odlévání probíhá na vzduchu nebo ve vakuu. Odlévat se může do teplé keramické formy při teplotě 780-800°C nebo při teplotě okolí (nelze použít u křemenných ostřiv a to z důvodu transformace krystalické mřížky na teplotě 572°C). [1, 2, 3]

### 1.1.8 Ostatní operace

Mezi další operace patří odstranění keramické formy, ke kterému může docházet vibračně, abrazivem nebo tlakovou vodou. Dalším krokem je oddělení vtokové soustavy pomocí kotoučové nebo pásové pily. Materiál, který přebývá, je oddělen od odlitku pomocí pásové brusky. Pro usnadnění oddělování vtokové soustavy a broušení je potřeba správně navrhnout vtokovou soustavu. Jako další operace se zařazuje tryskání pro optické sjednocení povrchu. [2, 3]



Obr. 1.1 Princip technologie vytavitelného modelu. [1]

## **1.2 Voskové směsi**

V technologii přesného lití je potřebná dobrá znalost vlastností všech složek voskových směsí a tím i výsledné vlastnosti celé směsi. Tato znalost je nutná z důvodu, že každý chybný voskový model znamená chybný odlitek. [1]

### **1.2.1 Druhy voskových směsí**

Voskové směsi využívané pro přesné lití se dají rozdělit do několika základních skupin: [4]

#### **1.2.1.1 Vosky na modely**

Jejich primární použití je na výrobu voskových modelů. Tyto vosky dosahují dobrých vlastností a mohou být vstřikovány na všech vstřikolisech. Pro jejich opakované použití se vosky mohou rekonstituovat nebo regenerovat. [4, 5, 6]

##### **1.2.1.1.1 Neplněné (přímé) vosky**

Neplněné vosky mohou být vstřikovány v širokém rozsahu teplot. Maximální vstřikovací teplota je přibližně 120°C. Jejich hlavní výhodou je jednoduchá regenerace a rekonstituce. Mezi další výhody se řadí nízký obsah popela a vysoká kvalita povrchu voskového modelu. Mezi nejvýznamnější nevýhodu neplněných vosků patří četný výskyt propadlin. Této deformaci modelu se může předcházet aplikací chlazení voskového modelu. [4, 7, 8]

##### **1.2.1.1.2 Emulzifikované vosky**

Emulzifikované vosky mají podobné vlastnosti jako neplněné vosky. Hlavní rozdíl oproti neplněným voskům je obsah plniva (voda nebo vzduch). Přítomnost plniva ovlivňuje pozitivně rozměrovou stabilitu a výskyt propadlin. Obsah plniv ve vosku se pohybuje mezi 7-12 %. Voskové modely z emulzifikovaného vosku se vyznačují hladkým povrchem a snadným vyjímáním z matečné formy. Maximální teplota pro plnění matečné formy je 95 °C. [5, 7, 8]

### **1.2.1.1.3 Plněné vosky**

Tento typ vosků je vhodný pro tenkostěnné modely s velkou tvarovou složitostí. Voskové modely z plněných vosků se zhotovují na vstřikolisech. U plněných vosků je plnivem organická látka, která má podobu prášku a je nerozpustná v základním vosku. Obsah plniva se pohybuje v rozmezí 20-40 %. Organické plnivo má stejný vliv na kvalitu vosku jako plnivo u emulzifikovaných vosků. Plnivo zlepšuje rozměrovou stabilitu a snižuje vznik propadlin povrchu. Dále musí mít podobnou hustotu jako vosková směs, aby nedocházelo k segregaci plniva v tekutém stavu vosku. Plnivo také musí dosahovat dostatečné jemnosti, aby nedocházelo k hrubnutí povrchu voskového modelu. Obsah popela ve vosku je nízký. Maximální vstřikovací teplota plněných vosků se pohybuje okolo teploty 120 °C. [2, 6, 8]

### **1.2.1.2 Vosky na vtoky**

Tato skupina vosků se vyznačuje podobným složením jako neplněné vosky. Vosková směs je upravena na vyšší pevnost a to z toho důvodu, že musí unést váhu modelu. Na vtokovou soustavu se také často používají přímé modelové vosky, které byly regenerovány. [2, 8]

### **1.2.1.3 Vodou rozpustné vosky**

Vodou rozpustné vosky jsou plněné vosky. Jako aditiva se používají speciální látky, které se mohou rozpouštět ve vodě nebo slabých kyselinách. Těchto vlastností se využívá pro výrobu voskových vyplavitelných jader. Jádra zhotovená z vodou rozpustných vosků dosahují dobré rozměrové stability s malým sklonem k propadlinám povrchu. Maximální teplota vstřikování se pohybuje kolem 60 °C. [8, 9]

### **1.2.1.4 Speciální vosky**

Speciální vosky patří do skupiny neplněných voskových směsí. Svoje využití mají především díky svým speciálním vlastnostem. [10]



#### **1.2.1.4.1 Namáčecí vosky**

Jedná se o voskové směsi využívané pro utěsnění škvír a spár. Jsou vhodné díky své nízké viskozitě, která umožňuje snadnou penetraci voskové směsi do vad na povrchu voskového modelu. [10]

#### **1.2.1.4.2 Vosky na opravy**

Jedná se o vosky určené na opravu poškozených voskových modelů a k utěsnění vtokových soustav. Jejich použití pro opravy je dáno jejich plasticitou při pokojové teplotě. Vosky na opravy dělíme na měkké a tvrdé. [10]

#### **1.2.1.4.3 Vosky na lepení**

Vosky určené na lepení mají vysokou adhezi. Používají se k přilepování vtokových soustav a spojování částí voskových modelů. [11]

#### **1.2.1.5 Recyklované vosky**

Jde o voskové směsi, které během průběhu technologie přesného lití byly znehodnoceny. Následné zpracování voskových směsí umožní jejich opětovné použití. Podle použité technologie jsou voskové směsi použity na výrobu modelů nebo vtoků. Recyklací se docílí buď stejných nebo podobných technologických vlastností. Recyklace voskových směsí se dělí na: [11, 12]

##### **1.2.1.5.1 Regenerace**

Regenerace je jednoduchý proces, při kterém je vosk čištěn a důkladně filtrován. Pokud po regeneraci v upraveném vosku zbývá část plnidla, vosk dosahuje lepších vlastností než vosk určený na výrobu vtoků. Proto se regenerovaný vosk využívá pro výrobu vtokových soustav. Vosk už nemůže být použit na výrobu voskových modelů, jelikož nedosahuje požadovaných vlastností. [11, 12]

##### **1.2.1.5.2 Rekonstituce**

Během procesu rekonstituce dochází k čištění a důkladné filtraci voskové směsi (regenerace). Po regeneraci voskové směsi jsou přidávány nové složky, které upraví vlastnosti vosku na požadované hodnoty. Po úspěšné rekonstituci

voskové směsi nelze naměřit rozdíl vlastností oproti panenskému vosku. Rozměrová přesnost rekonstituovaného vosku je také totožná. [11, 12]

### **1.2.2 Základní složky voskových směsí**

Vlastnosti voskových směsí jsou ovlivňovány jejich základními složkami. Podle jejich složení a množství jednotlivých složek se dosahuje odlišných vlastností voskových směsí.

#### **1.2.2.1 Parafín**

Parafín je využíván pro výrobu měkkých voskových směsí a mezi jeho nejdůležitější vlastnosti patří křehkost a nízká pevnost. Teplota tuhnutí se pohybuje okolo 30 °C a k natavení parafínu dochází nejpozději při teplotě 64 °C. Obsah popela se pohybuje až do hranice 0,1 %. Parafín je používán na výrobu modelů pomocí plniček nebo gravitačně. [13]

#### **1.2.2.2 Mikrokrystalický vosk**

Strukturu mikrokrystalických vosků tvoří mikrokrystaly, které jsou jemnější než u parafínu. To má za následek zvýšení pevnosti a ohebnosti. Tyto vosky jsou houževnatější, lepivější a pružnější než parafín, tají při vyšší teplotě (60 - 93 °C). [13, 14]

#### **1.2.2.3 Tvrdý vosk**

Tvrdé vosky se vyznačují nízkou viskozitou a bodem tuhnutí v rozmezí 65 - 120 °C. Vosky jsou křehké a měkké. Tvrdý vosk může být přírodní nebo jako modifikovaná uhlovodíková směs. [13]

#### **1.2.2.4 Pryskyřice**

Pryskyřice se přidávají do voskových směsí za účelem ztekucení směsi. Jako ochrana před degradací voskové směsi mají být pryskyřice inertní. Existují 3 druhy pryskyřic: [13]

#### **1.2.2.4.1 Uhlovodíkové pryskyřice**

- uhlovodíkové pryskyřice mají bod měknutí v rozsahu teplot 18 - 176 °C
- objevují se jako produkty petrochemie (aromatická nebo monomerová pryskyřice) [13]

#### **1.2.2.4.2 Syntetické pryskyřice**

- syntetické pryskyřice mají bod měknutí v rozsahu teplot 25 - 190 °C
- objevují se jako organické sloučeniny (polymerová a esterová pryskyřice) [13]

#### **1.2.2.4.3 Přírodní pryskyřice**

- přírodní pryskyřice mají bod skápnutí v rozsahu teplot 80 - 180 °C
- jedná se o složité směsi organických složek (modifikované nebo polyesterové pryskyřice) [13]

#### **1.2.2.5 Polymery**

Polymery se přidávají pro zvýšení viskozity, houževnatosti a k ovlivnění dalších fyzikálních vlastností. Polymery jsou inertní, takže nedochází k jejich degradaci. Nejčastěji používaný polymer patří etylén vinyl acetát (EVA). Bod tavení se pohybuje v rozmezí teplot 50 - 200 °C. [14, 15, 16]

#### **1.2.2.6 Plniva**

Jedná se o látky, které se přidávají do voskových směsí za účelem snížení smrštění viz graf 2.1. Snížení smrštění zamezuje vzniku staženin při tuhnutí vosku nebo zmenšuje jejich velikost. Omezuje také nebezpečí prasknutí skořepiny při vytavování voskové směsi. Moderní plniva zvyšují rozměrovou stabilitu, mechanické vlastnosti a zlepšují chování směsí při plnění do matečné formy. Veškerá plniva jsou inertní. S rostoucím obsahem plniva roste také viskozita směsi. Výběr plniva je závislý na požadovaných vlastnostech voskové směsi a způsobu regenerace. [14, 15, 16]

#### **1.2.2.6.1 Bisfenol A**

Jedná se o organickou sloučeninu využívanou také v potravinářském průmyslu. Vosk do kterého je přidán bisfenol A (BPA) je dobře tekutý a to umožňuje vstřikování za nižších teplot. BPA je vhodné plnivo pro slévárny, které chtějí regenerovat voskovou směs vlastními prostředky. Hustota BPA je  $1,20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a při zahřátí vosku nad  $100^\circ\text{C}$  dochází k jeho usazování. [14, 15, 16]

#### **1.2.2.6.2 Zesíťný polystyren**

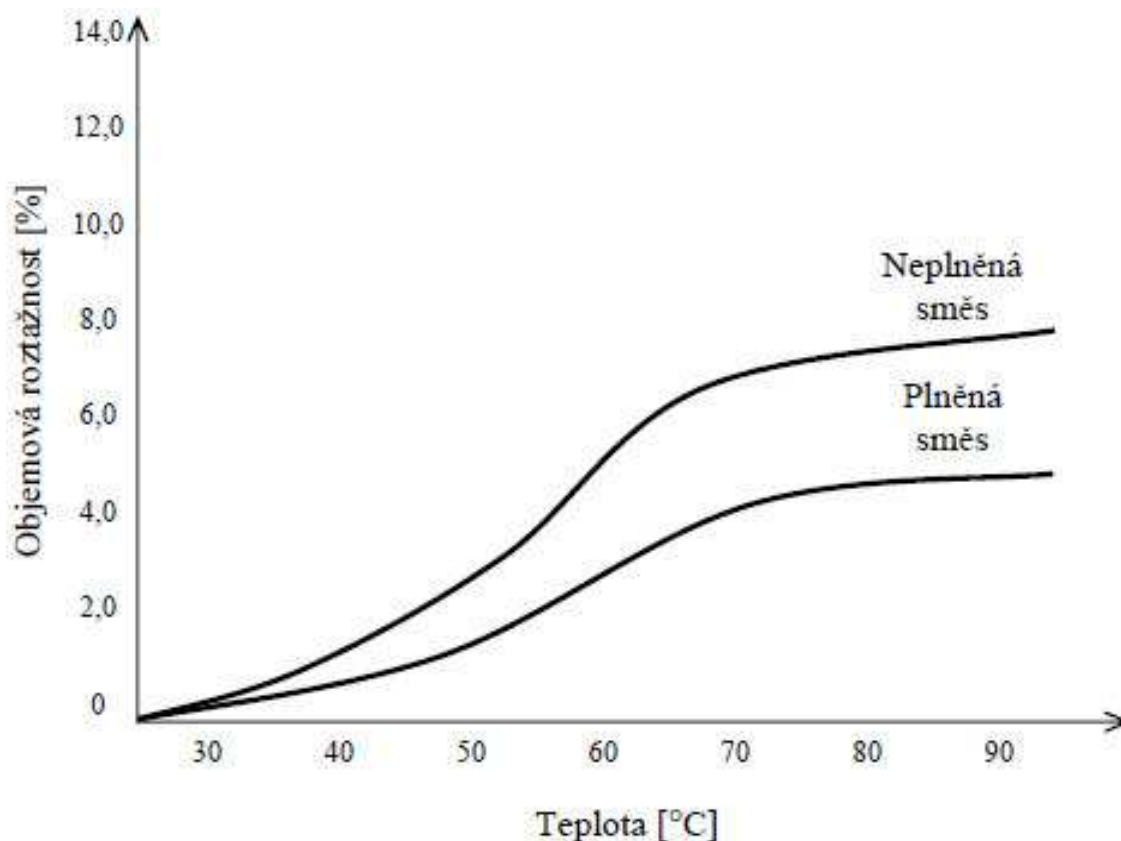
XLPS je organické plnivo, které je tepelně stabilní. Jeho hustota je  $1,07 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a díky tomu téměř nedochází k jeho usazování. Přidání plniva do vosku zaručuje velmi dobrou rozměrovou stálost a jeho regenerace je snadná. Jeho hlavní nevýhodou je vysoká cena. [14, 15, 16]

#### **1.2.2.6.3 Voda**

Voda je jedním z nejrozšířenějších plniv. Hlavní předností tohoto plniva jsou nízké náklady na pořízení i regeneraci. Snižuje výskyt bublin a zvyšuje kvalitu voskového modelu. Nevýhoda vody je nutnost přesného dodržování teplot, protože při vysoké teplotě dochází k vypařování vody a tím ke vzniku neshodných kusů. [14, 15, 16]

#### **1.2.2.6.4 Kyselina**

Kyseliny, jako plnivo, jsou používány často v kombinaci s XLPS. Je to dáno jejich vysokou hustotou  $1,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Vzhledem k vysoké hustotě dochází k usazování. Pro eliminování tohoto problému se vosková směs musí neustále míchat. Jejich výhodou je nižší cena než u XLPS. Modely vyrobené z voskové směsi s plnivem z kyselin se vyznačují dobrým povrchem. Jako plnivo se používají např. kyselina tereftalová a isoftalová. [14, 15, 16]



Graf 1.1 Vliv plniv na roztažnost voskových směsí [1]

### 1.2.3 Vlastnosti voskových směsí

Pro vybrání správného vosku na výrobu daného modelu je potřebné znát co nejvíce vlastností voskové směsi, které udávají jak se bude tato směs chovat. Podle zjištěných dat se potom vybírá nejvhodnější vosk pro výrobu vybraného modelu. Ideální vlastnosti voskových směsí popisuje zdroj [1] takto:

- Směs by měla vykazovat minimální změny rozměrů (smrštění při chladnutí a roztažnost při ohřevu).
- Směs by měla mít dostatečnou tvrdost a pevnost po ztuhnutí a nevykazovat křehkost.
- Směs by měla být inertní jak vůči vzduchu tak keramické břečce.
- Zhotovený model by měl mít vysokou smáčivost při kontaktu s keramickou břečkou.
- Směs má obsahovat minimální množství popela.

- Směs by měla dokonale kopírovat tvar a rozměry matečné formy a neměla by se na ní lepit. Povrch modelu by měl být čistý a hladký.
- Směs by měla být dokonale recyklovatelná a zdravotně nezávadná.
- Směs by měla mít co nejnižší hustotu pro omezení poškození modelu vlastní vahou.
- Doba tuhnutí modelu by měla být co nejkratší.
- Struktura směsi by měla být izomorfní.

### **1.3 Numerická simulace**

Pojmem simulace je označováno napodobení nějaké skutečné věci, stavu nebo procesu. Počítačová simulace pracuje ve virtuálním prostředí, které umožňuje zkoumání principu nebo zákonitosti daného procesu z reálného prostředí. Procesy z reálného prostředí a způsoby jejich řešení jsou podrobně matematicky popsány.

Pro numerické řešení rovnic se nejčastěji používá metoda konečných prvků (MKP). Tato metoda pracuje na fyzikálním nahrazení spojitého prostředí do velkého množství elementárních částí (plošných nebo prostorových). Tyto elementární části vytváří tzv. výpočtovou síť, která umožňuje získat řešení s přijatelnou chybou. Metod MKP existuje velké množství, avšak liší se způsobem, jakým popisují elementární části. [17]

Široké využití simulace je v dnešní době dáno její relativní finanční nenáročností. Počáteční náklady jsou dány cenou programu, zaškolením pracovníku a cenou výpočetní techniky. Tyto počáteční náklady však v průběhu času jsou mnohonásobně menší s porovnáním výroby zkušebních odlitků, forem a dalších procesů souvisejících s výrobou a úpravou technologie během výroby.

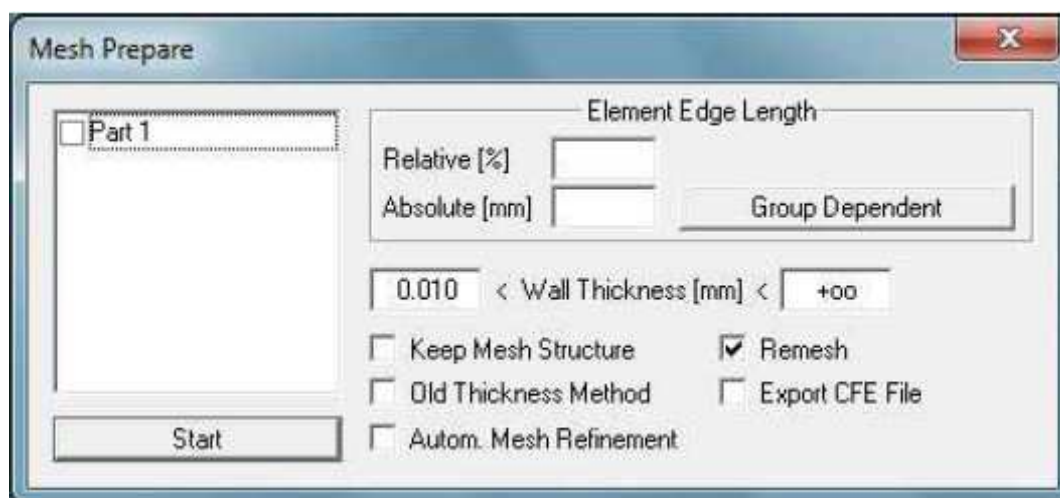
#### **1.3.1 Simulační software CADMOULD 3D-F**

Program byl vyvinut pro simulaci výroby plastových dílů na vstřikolisu. Plastové výrobky mají převážně zanedbatelnou tloušťku k jejich délce a šířce. Proces proudění je matematicky popsán jako proudění mezi dvěma stěnami. Vtokový systém pro vstřikovací cyklus není jednoduché matematicky zjednodušit stejným principem jako u modelu. Z tohoto důvodu program

obsahuje tvorbu vtokové soustavy z válcovitých částí, kde jsou následně popsány jejich průřezy jako speciální typ válcových elementů. Pro spuštění simulace je potřeba splnit několik základních bodů: [18]

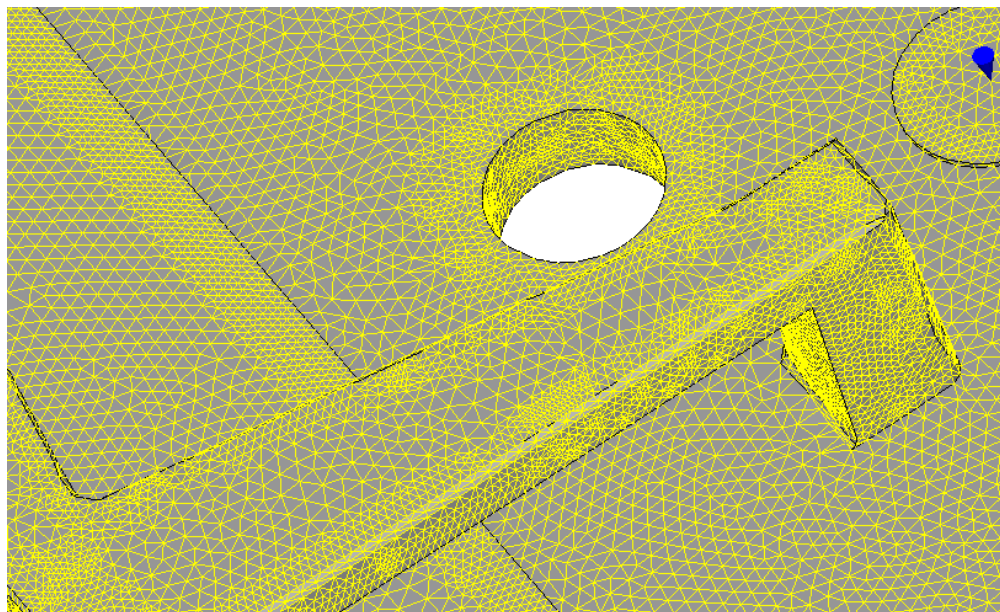
### 1.3.1.1 Tvorba výpočtové sítě

Po načtení modelu dílu ve formátu .stl je potřeba vytvořit výpočtovou síť. Zde se může nastavit rozměr hrany elementu v milimetrech nebo procentech hrany. Rozměr musí být zvolen tak, aby na každé ploše byly minimálně 3 elementární části. Je to z důvodu přesnosti simulace. Výpočtová síť je tvořena z jednotlivých prvků, které mají tvar trojúhelníku. Pro tvorbu výpočtové sítě je důležité, aby model byl vytvořen v jednom CAD systému a pokud možno z jednoho dílu. Výpočtová síť se dá vytvořit také pomocí speciálních programů určených pro tento účel. [18]



Obr. 1.2 Tvorba výpočtové sítě [18]

Na Obr. 1.2 je zobrazeno dialogové okno určené pro vytvoření výpočtové sítě. V první části se vybírá objekt, pro který je tvořena výpočtová síť (Part 1). V nastavení Relative [%] lze nastavit rozměr elementu výpočtové sítě v procentech velikosti hrany. Nastavení Absolute [mm] udává tuto velikost v milimetrech. Nastavení Remesh se využívá pro přepočítání stávající sítě. Lze také nastavit funkci Autom. Mesh Refinement, která zjemňuje výpočtovou síť na hranách modelu, pro získání přesnějších výsledků. [18]

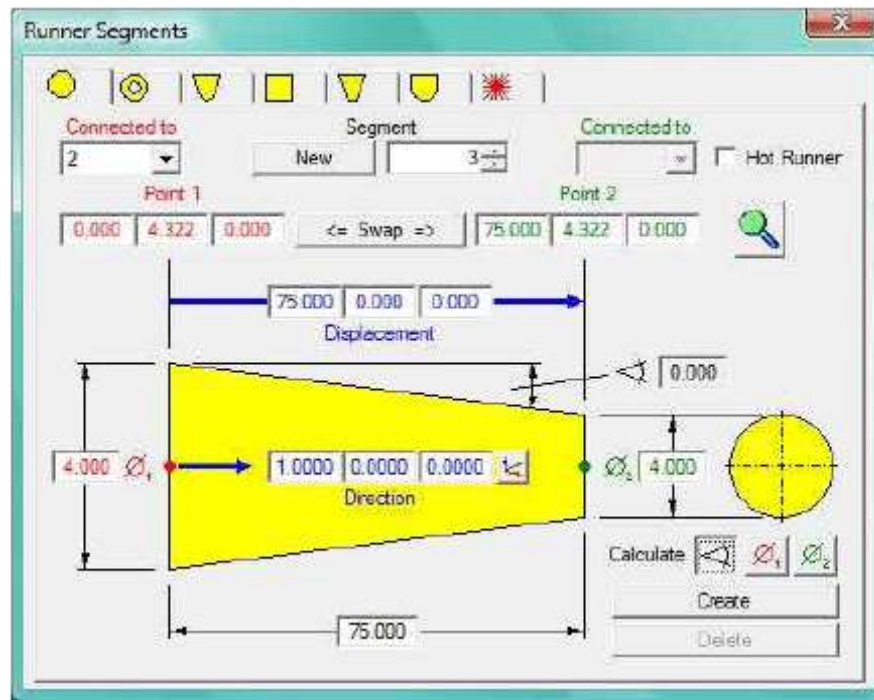


Obr. 1.3 Ukázka vytvořené výpočtové sítě na testovací geometrii II s nastavením Automatic Mesh Refinement.

### 1.3.1.2 Tvorba vtokové soustavy

Pro simulaci vstřikování je nezbytné, aby byla navrhnutá vtoková soustava. Na výběr je z několika základních tvarů (viz Obr. 1.4). Jejich rozměry se dají libovolně volit. Jediné co se musí důkladně sledovat je, aby jednotlivé díly vtokové soustavy na sebe navazovaly a byly spojeny. To také platí u připojení vtokové soustavy na model. V případě chybného propojení jednotlivých segmentů vtokové soustavy by došlo k chybové hlášce. Tento problém by byl odhalen v tvorbě vtoků, který je podmíněn propojením jednotlivých prvků vtokové soustavy. [18]

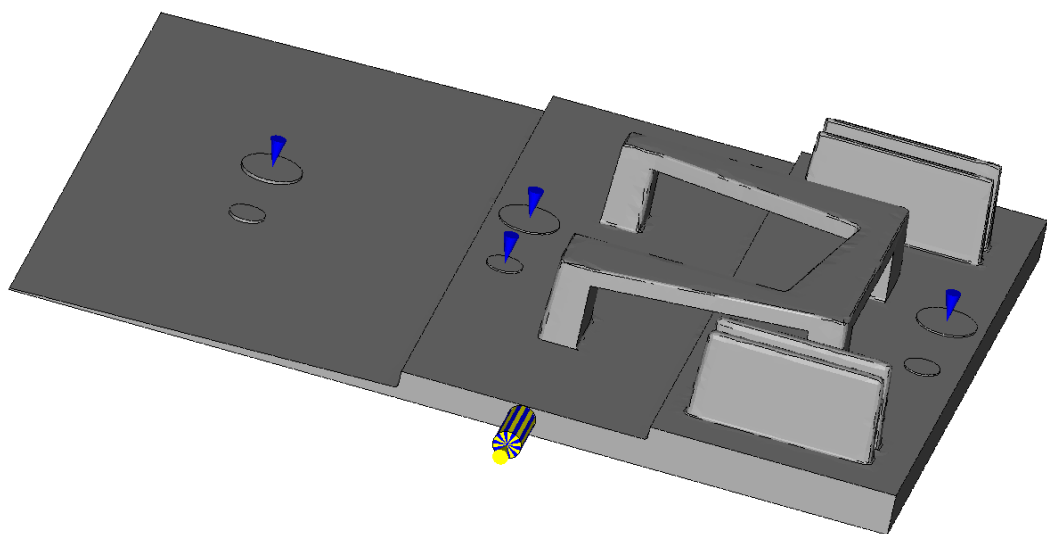




Obr. 1.4 Tvorba vtokové soustavy. [18]

### 1.3.1.3 Tvorba vtoku

Dalším krokem simulace je zadání místa odkud bude materiál plněn. V případě, že vtoková soustava je správně navržena a připojena na model, je automaticky vytvořen vtok na konci vtokové soustavy. [18]



Obr. 1.5 Testovací geometrie II. Modré kužely označují umístění senzorů, žlutý kužel označuje místo vtoku a modrožlutý válec je vytvořená vtoková soustava.

### 1.3.1.4 Volba materiálu

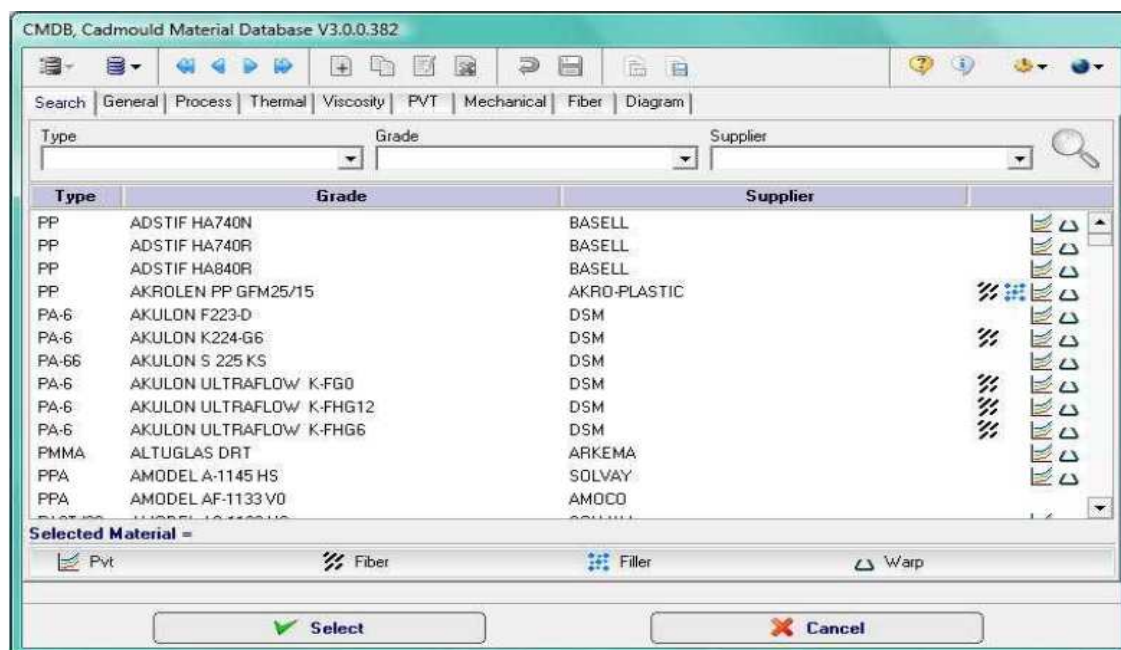
Součástí programu CADMOULD je i materiálová databáze, která obsahuje spoustu plastových materiálů. Avšak pro simulaci voskových směsí je potřeba vytvořit nový materiál v databázi programu. Pro vytvoření nového materiálu je potřebná znalost reologických, tepelných a mechanických vlastností materiálů. [18]

Pro vytvoření materiálu pro výpočet průběhu plnění a teplotního pole je potřeba zadat tato data: [18]

- Viskozita
- Tepelná vodivost
- Specifická tepelná kapacita
- Hustota
- PVT data

Pro celkovou simulaci, která obsahuje také analýzy smrštění a deformace, je potřebné zadat : [18]

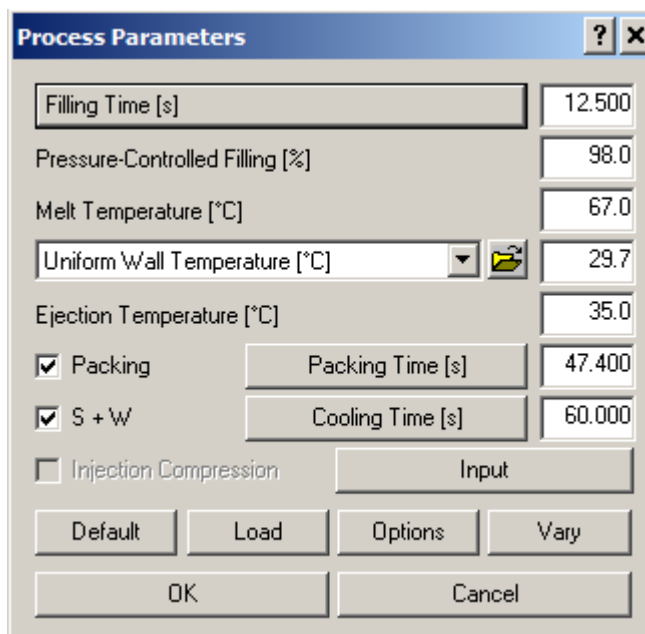
- Youngův modul
- Modul pružnosti ve smyku
- Poissonovo číslo
- Koeficient lineární teplotní roztažnosti



Obr. 1.6 Materiálová databáze s ukázkou dostupných plastových materiálů. [18]

### 1.3.1.5 Zadání podmínek simulace

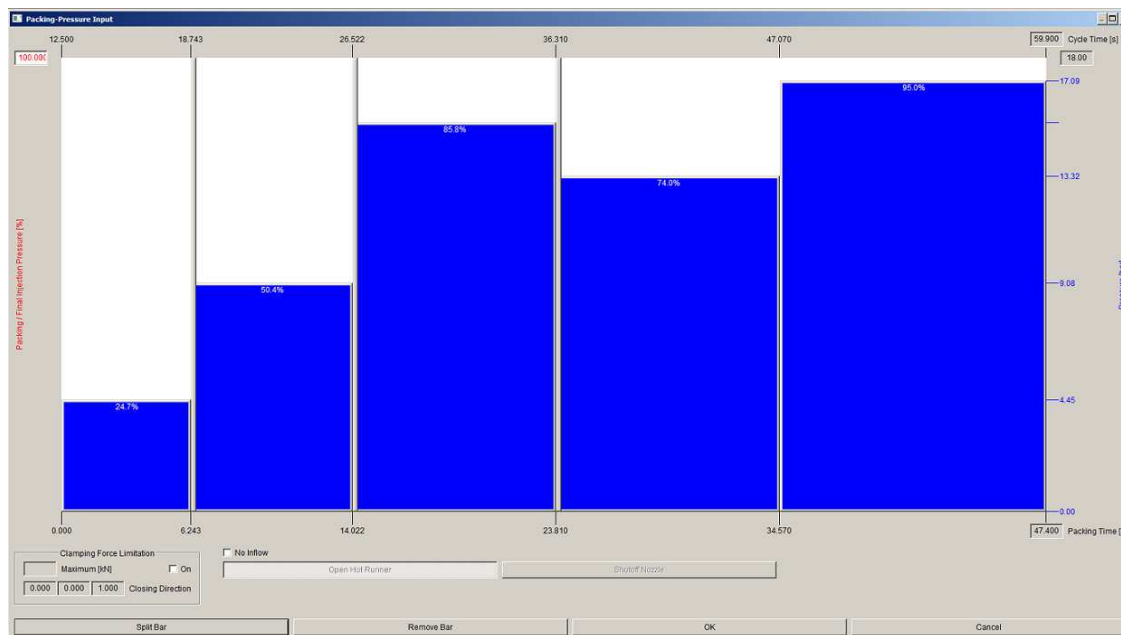
Z reálného procesu výroby můžeme zadat počáteční podmínky simulace (viz Obr. 1.7 a Obr. 1.8). Jedná se o teplotu vstřikovaného materiálu, teplotu formy, průběh a velikost průtoku a tlaku během vstřikovacího cyklu a dobu simulace. Jako další se dá nastavit koeficient přestupu tepla mezi voskovou směsí a formou a jaké výsledky se budou počítat (průběh plnění, působení dotlaku, deformace a smrštění). Pro zpřesnění výsledků simulace je potřeba naměřit procesní data na vstřikolisu, jelikož skutečné hodnoty od těch nastavených se mohou výrazně lišit. [18]



Parameter	Value
Filling Time [s]	12.500
Pressure-Controlled Filling [%]	98.0
Melt Temperature [°C]	67.0
Uniform Wall Temperature [°C]	29.7
Ejection Temperature [°C]	35.0
Packing (checked)	Packing Time [s]: 47.400
S + W (checked)	Cooling Time [s]: 60.000
Injection Compression (unchecked)	Input

Buttons: Default, Load, Options, Vary, OK, Cancel

Obr. 1.7 Nastavení parametrů procesu numerické simulace



Obr. 1.8 Nastavení plnicího tlaku – Tlak lze nastavit v průběhu simulace na hodnoty odpovídající reálnému průběhu, např. do pěti časových intervalů, kde každý nabývá jiné hodnoty tlaku. Stejný princip nastavení platí pro nastavení průtoku.

### 1.3.1.6 Vyhodnocení výsledků

Program Cadmould 3D-F umožňuje výpočet spousty výsledků. Jejich výčet je uveden v následující části a to takto : Tučně označené prvky jsou názvy jednotlivých sekcí výsledků, normální písmo označuje jednotlivé názvy výsledků, v hranatých závorkách jsou uvedeny jednotky a v kulatých závorkách je uveden český název výsledku. [18]

**Result Summary** (Souhrn všech výsledků simulace v textovém souboru)

**Cavity** (Dutina)

**Flow Front** (Průběh plnění)

- Time When Filled [s] (Průběh plnění - čas)
- Level When Filled [%] (Průběh plnění - %)
- Filled by Gate (Plněno vtokem)
- Pressure Loss [bar] (Ztráty tlaku)
- Shear Stress When Filled [kPa] (Smykové napětí během plnění)
- Temperature When Filled [°C] (Průběh teploty)
- Velocity When Filled [mm/s] (Průběh rychlosti)

**Snapshot Filling** (Snímky plnění v časových intervalech)

- Temperature [°C] (Průměrná teplota v celé tloušťce stěny)
- Pressure [bar] (Aktuální tlak v každém místě části)
- Shear Stress [kPa] (Maximální smykové napětí v každém místě části)
- Velocity [mm/s] (Průměrná rychlost v tloušťce stěny)
- Frozen Layer Thickness [%] (Tloušťka zamrzlé vrstvy)
- Free Cross Section [mm] (Tloušťka průtoku)
- Volume Shrinkage [%] (Objemové smrštění)

**Filling Orientation Degree** (Stupeň orientace plnění)**Diagrams** (Diagramy)

- Injection Pressure [bar] vs. Time [s] (Vstřikovací tlak v čase)
- Flow Rate [cm<sup>3</sup>/s] vs. time [s] (Průtok v čase (na vtoku))
- Clamping Force X, Y, Z [kN] (Uzavírací síla v ose X, Y, Z)
- Level of filling [%] (Stupeň naplnění)
- Mass [g] (Objem včetně vtoků)
- Mass - Gate [g] (Objem vtoků)
- Mass Flow - Gate [g/s] (Objemový průtok vtokem)
- Force X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Z<sub>n</sub> on object group [kN] (Síla X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Z<sub>n</sub> na skupinu objektu)
- Moment X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Z<sub>n</sub> on object group [Nm] (Moment X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Z<sub>n</sub> na skupinu objektu)

**Residual Stress** (Reziduální napětí)

- Avg. Hydrostatic (Průměrné hydrostatické napětí – lze zobrazit jako diagram)
- Max. Von Mises (Průměrné napětí Von Mises – lze zobrazit jako diagram)

**Part Quality** (Kvalita dílu)

- Filling Problems (Problémy během plnění)
- Sinkmarks (Staženiny)
- Ejection Time [s] (Čas vyhození části z formy)
- Sealing Time [s] (Čas zamrznutí vtoku ve spoji s částí)
- Freezing Time [s] (Čas zamrznutí)

- Gradient Volume Shrinkage (Gradient objemového smrštění)

**Snapshot Packing** (Snímky části v časových intervalech po dobu dotlaku)

- Popis viz. skupina Snapshot Filling

**Packing Orientation Degree** (Stupeň orientace dotlaku)**Shrinkage and Warpage (Cooling)** - (Smrštění a deformace během chlazení)

- Max. Temperature (Maximální aktuální teplota v celé části)
- Min. Temperature (Minimální aktuální teplota v celé části)

**Shrinkage and Warpage (Ejection and Final)** (Smrštění a deformace)

- X, Y, Z-Deformation [mm] (Deformace v ose X, Y, Z)
- Deformation [mm] (Deformace)
- Shrinkage [%] (Průměrné smrštění)
- X, Y, Z-Warpage [mm] (Deformace v ose X, Y, Z)
- Warpage [mm] (Deformace)
- Curvature Change [%] (Deformace pro zakřivené plochy)

**Residual Stress Interior** (Zbytkové napětí po ochlazení)

- Avg. Hydrostatic (Průměrné hydrostatické napětí)
- Max. Von Mises (Maximální von Mises napětí)

**Wall Temperature Analysis** (Analýza teploty stěny)

- Max. Temperature [°C] (Max. teplota stěny)
- Min. Temperature [°C] (Min. teplota stěny)

**Heating/Cooling System** (Systém ohřívání a chlazení)

- Flow Rate [cm<sup>3</sup>/s] (Průtok systému)
- Reynolds number [1] (Reynoldsovo číslo)
- Heat transfer coefficient [W/(m<sup>2</sup>K)] (Koeficient přestupu tepla)
- Heat flow efficiency [1] (Účinnost tepelného toku)
- Temperature [°C] (Teplota systému)

**Sensor** (Senzory)

- Pressure [bar] (Tlak)
- Temperature [°C] (Teplota)
- Viscosity [Pa.s] (Viskozita)
- Shear Rate [1/s] (Smykové namáhání)
- Specific Volume [cm<sup>3</sup>/g] (Objem)

### 1.3.2 Zisk materiálových dat voskové směsi

Z předchozích kapitol vyplývá, že pro simulaci plnění voskové směsi do matečné formy je potřeba vytvořit nový materiál v databázi. Je to dáno tím, že žádný simulační software není určen přímo pro simulaci plnění voskové směsi.

Pro vytvoření nového materiálu je potřeba zadat charakteristické informace o materiálu viz kapitola 1.3.1.4. Materiálová data byla získána a naměřena pro materiál Remet Hyfill B478. [19]

Data, která jsou dodávána od výrobce v rámci materiálového listu: [19]

- 1) Bod tavení: 70°C
- 2) Bod gelace: 65°C
- 3) Penetrace při 25°C: 4 dmm
- 4) Penetrace při 43.3°C: 30 dmm
- 5) Viskozita při 80°C: 900 cPs
- 6) Obsah plniva: 30 % hmotnostních
- 7) Obsah popela: max. 0,03 %hm.
- 8) Barva: zelená
- 9) Oblast tavení: 65-75°C
- 10) Relativní hustota: 1,05

Všechna zbylá materiálová data potřebná pro tvorbu materiálu byla naměřena ve spolupráci s chemickou laboratoří a výrobcem voskové směsi. Po naměření všech potřebných materiálových dat byly výsledky těchto měření odeslány dodavateli simulačního softwaru, který provedl tvorbu nového materiálu. Výsledky jednotlivých měření jsou podrobně popsány v literatuře uvedené jako [19] ve zdrojích této práce. [19]

### 1.3.3 Testovací forma I

Pro validaci numerické simulace programu Cadmould 3D-F byla navržena testovací forma I. Tato forma byla navržena pro záznam průběhu plnění voskové směsi. Přední stěna formy je tvořena z 20mm tlustého plexiskla a zbytek formy je tvořen z hliníkové slitiny. Dutina formy je tvořena ze tří hlavních

částí (2x kvádr a 1x klín). Forma umožňuje plnění pěti vtokovými pozicemi. Maximální rozměry formy jsou 135x100x20mm. [19]



Obr. 1.9 Vlevo pohled na testovací formu I. Vpravo model vyrobený pomocí testovací formy I [19]

### 1.3.3.1 Experimentální měření

Experimentální měření bylo uskutečněno za účelem získání průběhů plnění voskové směsi jednotlivých odstříků testovací formy I. Z tohoto důvodu byly jednotlivé odstříky zaznamenávány na kameru. Dalším cílem bylo ověřit vliv umístění vtokového kanálu. Proto měření bylo provedeno ve všech pěti vtokových otvorech. [19]

### 1.3.3.2 Validace numerické simulace

Numerická simulace byla provedena vždy pro každé nastavení z experimentálního měření. Výsledky simulace byly následně srovnávány se získanými záznamy. A z jejich porovnání byl vyvozen další postup v celém experimentu. [19]

### 1.3.3.3 Shrnutí

Ze získaných záznamů průběhů plnění bylo zjištěno, že většina plnění je přerušena na dobu 1,2sec. Přerušování plnění testovací formy komplikovalo validaci numerické simulace a z toho důvodu toto přerušování pro porovnávání nebylo uvažováno. Z experimentálního měření dále nebyl zřejmý vliv nastaveného parametru pressure a to s největší pravděpodobností z důvodu

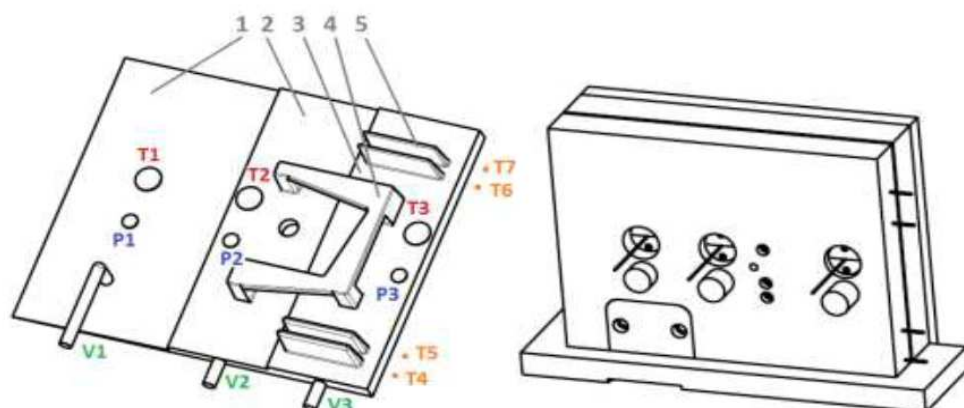


malého objemu testované formy (cca 50cm<sup>3</sup>). Vliv nastavení parametru flow byl zřejmý. S rostoucím parametrem flow rostla velikost průtoku voskové směsi. Ze získaných dat však nebylo zřejmé, zda se ovlivňují parametry flow a pressure. Také není jasné, zda nastavené hodnoty odpovídají skutečným hodnotám tlaku a průtoku. [19]

#### **1.3.4 Testovací forma II**

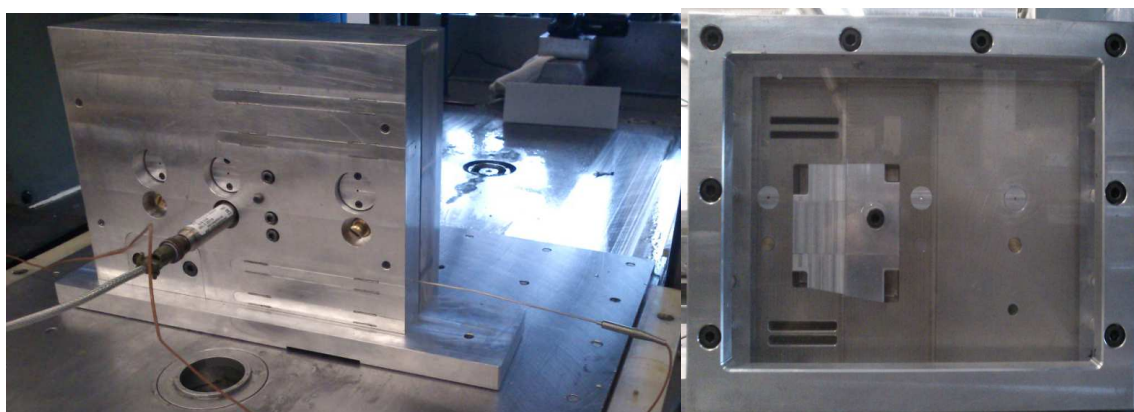
Jedny ze základních dat, které velkou měrou ovlivňují přesnost simulace, jsou vstřikovací podmínky: hodnota tlaku, teploty voskové směsi a průtok voskové směsi. Nastavené hodnoty na vstřikolisu nemusí odpovídat skutečné hodnotě dané veličiny. Během vstřikovacího cyklu může také docházet k odchylkám od nastavených hodnot v průběhu času. Proto je potřeba provést měření průběhů tlaků a průtoků voskové směsi na vybraném vstřikolisu. Další velmi důležitou částí je převod dat z nastavených (naměřených) hodnot na veličiny zadávané do simulačního softwaru Cadmould 3D-F a stanovení vztahů pro přepočet z nastavených hodnot na hodnoty zadávané do simulačního softwaru. Takto získané vztahy by značně usnadnily reálné použití simulací v provozu sléváren. [19]

Ze zkušeností s testovací formou I byla navržena nová testovací forma II. Tato forma II umožňuje snímat průběh zaplňování dutiny formy voskovou směsí. Pro získání průběhu plnění byla forma navržena tak, že v přední části je tvořena litým plexisklem o tloušťce 40mm. Dále ve formě byly navrženy odnímatelné prvky, které po svém nahrazení měřicím aparátem umožňují měřit průběh teplot na teplotních čidlech a tlak uvnitř dutiny během vstřikování. [19]



Obr. 1.10 Vlevo - tvar dutiny testovací formy II. Šedá čísla označují hlavní tvarové části dutiny. Červená čísla (T1, T2, T3) pozice pro umístění termočláňku (teplota voskového modelu). Oranžová čísla (T4, T5, T6, T7) pozice pro umístění termočláňku (teplota formy). Modrá čísla (P1, P2, P3) pozice pro umístění tlakových senzorů. Zelená čísla (V1, V2, V3) vtokové otvory. Vpravo - pohled na sestavenou testovací formu II. [19]

Hlavní části geometrie 1, 2 a 3 (viz Obr. 1.10) byly navrženy podle testovacích geometrie I. Úprava těchto částí spočívala ve zvětšení rozměrů dutiny. Také byly přidány části 4 a 5 pro predikci nezaběhnutí a studených spojů. Tyto úpravy testovací formy I byly provedeny z důvodu potřeby validace rozměrově i tvarově složitějších voskových modelů. [19]



Obr. 1.11 Vlevo - Testovací forma II se zapojeným tlakovým (pozice P2) a teplotním čidlem (pozice T5) pohled zezadu; Vpravo - Testovací forma II pohled zepředu

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

Práce navazuje na předchozí výzkum, který v rámci získávání potřebných dat pro tvorbu numerické simulace provedl měření materiálových dat pro voskovou směs Remet Hyfill B478. Tato vosková směs je používána pro zhotovování matečných modelů ve spolupracující slévárně. Práce, která byla provedena před zahájením této diplomové práce, je stručně popsána v kapitolách 1.3.2 a 1.3.3.

Simulační software umožňuje zadat hodnoty průtoku a tlaku nejen jako konstantní hodnotu, ale také jako časově závislou veličinu. Proto je potřeba zjistit, jakým způsobem se hodnoty těchto parametrů mění.

Cílem praktické části je naměřit reálný průběh tlaku v dutině formy během vstřikovacího cyklu vstřikolisu. Velikost tlaku v závislosti na čase vstřikovacího cyklu bude použit pro zpřesnění výpočtů numerické simulace. Měření tlaku je také navrženo k ověření skutečnosti, zda nastavená hodnota tlaku odpovídá naměřené velikosti tlaku. Nastavená hodnota tlaku se dá zjistit po přepočtu dle manuálu vstřikolisu. V případě odlišnosti nastavené hodnoty tlaku od její skutečné hodnoty zkusit stanovit vztah pro přepočet nastavené hodnoty tlaku na skutečnou velikost tlaku.

Druhým cílem je naměřit průtok voskové směsi na vstřikolisu. Stejným způsobem jako u měření tlaku je potřeba stanovit jeho závislost na cyklu vstřikovacího cyklu. Z naměřených hodnot měření průtoku voskové směsi stanovit vztah mezi nastavenou hodnotou průtoku a jeho skutečnou velikostí.

Z důvodu nutnosti ověření výsledků numerické simulace je potřeba provést zkušební odstřiky pro danou geometrii dutiny. Tyto zkušební odstřiky je nutno zaznamenat. Snímky z pořízených záznamů budou použity pro validaci průběhu plnění voskové směsi v dutině formy predikovaného v numerické simulaci.

Posledním cílem diplomové práce je v případě nepřesnosti numerické simulace navrhnout další měření, které by pomohly zpřesnit výsledky numerické simulace.

## 2.1 Měření tlaku v testovací formě II

Hlavním cílem měření je stanovit závislost mezi nastavenou hodnotou a skutečnou hodnotou tlaku. Simulační software cadmould umožňuje zadání hodnoty tlaku do jednotlivých časových intervalů, pro které je velikost nastavené hodnoty odlišná (viz Obr. 1.8). Získání přesného průběhu tlaku během vstřikovacího cyklu je základem pro tvorbu přesné numerické simulace.

Dalším cílem měření je ověření, jakým způsobem ovlivňuje parametr flow velikost parametru pressure. Toto ovlivnění by bylo zaznamenáno při naměření odlišných tlaků pro stejném nastavení parametru pressure ale odlišné nastavení parametru flow.

Jeden ze dvou nejdůležitějších parametrů, které se na vstřikolisu nastavují, je parametr „pressure“. Tento parametr udává velikost tlaku, kterým je vosková směs vstřikována do matečné formy. Měření bylo provedeno na vstřikolisu Shell-O-Matic 60T-20/28. Na vstřikolisu se nachází ventil, který lze nastavovat na rozmezí hodnot 0-2000 dílků. Pro přepočítání na tlak v jednotkách používaných simulačním softwarem musíme použít vztah : [20]

$$p = D * 0,56 * 6.894757 * 10^{-2}. \quad (1)$$

p ... Nastavený vstřikovací tlak (bar)

D ... Nastavení parametru pressure (dílký)

Takto získaná hodnota tlaku je v barech. Rozmezí nastavení vstřikolisu tak odpovídá 0-78 barů [20].

### 2.1.1 Postup měření

Prvním krokem měření tlaku na testovací formě II byl získání nastavených teplot na vstřikolisu. Teploty voskové směsi na vstřikolisu Shell-O-Matic 60T-20/28 pro testovací formu II byly nastaveny shodně pro všechna měření (viz Tab. 2.1):

Místo	Teplota (°C)
Zásobník vosku 1	64
Zásobník vosku 2	64
Sběrné potrubí vosku	64
Vedení vosku - spodek	64
Blok trysky	64
Trysky - spodek	64

Tab. 2.1 Nastavené hodnoty teplot na vstřikolis

**Použité vybavení:** Notebook, vstřikolis Shell-O-Matic 60T-20/28, převodník DAQ Book100, testovací forma II, kamera Canon Legria HF R26, tlakové čidlo PX101V1, teplotní čidlo Pt-100, měřící program DaqView, pomůcky pro rozebrání testovací formy



Obr. 2.1 Uspořádání experimentu měření tlaku a teploty na testovací formě II.

Pro zahájení měření bylo potřeba testovací formu II nejprve rozebrat. Provést namazání dutiny formy prostředkem určeného na separaci voskového modelu od kovové formy. Po promazání testovací formy následovalo její sestavení a utažení proti pohybu jednotlivých částí formy.

Následovalo nastavení parametrů vstřikolisu. Nastavení hodnoty parametru flow a pressure podle plánu měření. Také proběhlo nastavení měřicího programu na notebooku.

Sestavená testovací forma II byla následně přenesena na vstřikolis, kde došlo k umístění a zapojení měřících čidel. Před každým novým odstříkem byla nejdříve zkontrolována data, která jsou zaznamenávána. Během experimentálního měření se tak zabránilo zkreslení získaných hodnot měřených parametrů. Tímto způsobem bylo dvakrát odhaleno, že dutina pro tlakové čidlo je částečně zaplněna voskovou směsí. Proto proběhla demontáž tlakového čidla a také vyčištění dutiny pro tlakové čidlo od zbytků voskové směsi.

Po úspěšném zapojení měřících čidel a ověření měřených dat byla testovací forma umístěna na pracovní desku vstřikolisu, kde zaujímala místo nad otvorem pro plnění formy. Forma byla na toto místo umístěna tak, aby její poloha umožňovala zisk videozáznamů.

Dalším krokem měření bylo posunutí pracovní desky nad vstřikovací ventil. Měření bylo zahájeno současně se spuštěním záznamu videokamery a záznamu teploty a tlaku na notebooku. Rozdílné umístění videokamery a notebooku vyžadovalo spolupráci dvou lidí. Pro co nejpřesnější současný začátek pořizování dat bylo měření odpočítáváno. Tyto záznamy byly ukončeny nezávisle na sobě s koncem vstřikovacího cyklu vstřikolisu.

Zahájení vstřikovacího cyklu bylo uskutečněno neprodleně po začátku záznamů měření. První částí vstřikovacího cyklu vstřikolisu je přitlačení formy pomocí horní pohyblivé přitlačné desky, která přidržuje formu proti vztlaku silou 60tun. Po uzavření formy následuje spuštění plnění dutiny testovací geometrie.

Vstřikovací cyklus vstřikolisu byl pro první dvě měření zkušebně nastaven na 40 sekund. Po provedení těchto dvou odstřiků byla vyhodnocena tato hodnota jako nedostatečná. Bylo tomu tak z důvodu doby plnění testovací formy II v těchto odstřicích. Při pozorování těchto měření bylo zřejmé, že

testovací forma není dostatečně dlouho vystavena dotlaku vstřikovacího stroje. To bylo zřejmé z toho, že docházelo k uvolnění formy v okamžiku ukončení plnění formy. Proto byl vstřikovací cyklus pro zbývající měření přenastaven na hodnotu 60 sekund.

Ukončení doby dotlaku vstřikolisu má za následek ukončení vstřikovacího cyklu. Proto dochází k odjetí přídržovací desky vstřikolisu a tím k uvolnění testovací formy. Pracovní stůl byl znovu vysunut pro manipulaci s formou. Po ukončení záznamu dat byla provedena demontáž měřících čidel. Testovací forma byla přenesena na pracovní stůl určený k montáži forem. Provedeno bylo uvolnění všech šroubů a došlo k rozebrání formy. Vzniklý voskový model byl vyňat a celý cyklus měření se opakoval.

Pro každé nastavení vstřikolisu byly provedeny dva odstříky s výjimkou 2IIA80a a 2IID30a. Měření 2IID30 bylo pořízeno z důvodu špatného nastavení parametru FLOW a měření 2IIA80 bylo pořízeno před poruchou plexiskla, což mělo za následek znemožnění opakovaného měření pro toto nastavení.

Značení odstříků: „2“ – Vstřikolis číslo 2; „II“ – testovací forma II; „A“ – parametr FLOW nastaven na 150 dílků další označení „A-E“ je vždy pro shodný průtok; „30“ – parametr pressure nastaven na „30“x10 = 300 dílků; „a“ – první měření nastavení (b – opakovaný odstřík pro shodném nastavení). Vstřikována byla vosková směs Remet Hyfill B478.

Měření bylo provedeno dle plánu měření, které je popsáno v Tab. 2.2.

Označení odstříku	Pracovní označení odstříku	Nastavený průtok (dílký)	Nastavený tlak (dílký)
2IIA30a	0	150	300
2IIA30b	1	150	300
2IIA30c	2	150	300
2IIA30d	3	150	300
2IIA80a	4	150	800
2IIA15a	5	150	150
2IIA15b	6	150	150
2IIB32a	13	250	320
2IIB32b	14	250	320
2IIC30a	7	300	300
2IIC30b	8	300	300
2IIC15a	10	300	150
2IIC15b	11	300	150
2IID30a	16	350	300
2IIE30a	17	450	300
2IIE30b	18	450	300

Tab. 2.2 Nastavení vstříkovacích parametrů experimentálního měření testovací formy II.

### 2.1.2 Naměřená data

Naměřená data z teplotního čidla jsou pořizována ve stupních celsia a jejich přesnost je na jedno desetinné místo. Data z teplotních čidel jsou zaznamenávána desetkrát za sekundu. Hodnoty z tlakového čidla jsou zaznamenávány ve voltech s přesností na tři desetinná místa ve stejných časových intervalech jako teplota. Takto získaná data je potřeba převést na jednotky tlaku podle kalibrační tabulky dodávané k tlakovému čidlu.



Výstupní napětí [Vdc]	Tlak [PSIG]	Tlak [bar]
<b>0.487</b>	0	0
<b>5.458</b>	1500	103
<b>10.467</b>	3000	207
<b>5.463</b>	1500	103
<b>0.491</b>	0	0

Tab. 2.3 Kalibrace tlakového čidla PX101V1. PSIG (Pounds Per Square Inch Gauge - manometrický tlak rovný libře na čtvereční palec)

Tlakové čidlo PX101V1 je kalibrováno na jednotky tlaku PSIG. Pro převod na pascaly, byl použit vztah:

$$p_n = ( -145,585941 + 300,810592 * x ) * ( 6,894757 * 103 ) \quad (2)$$

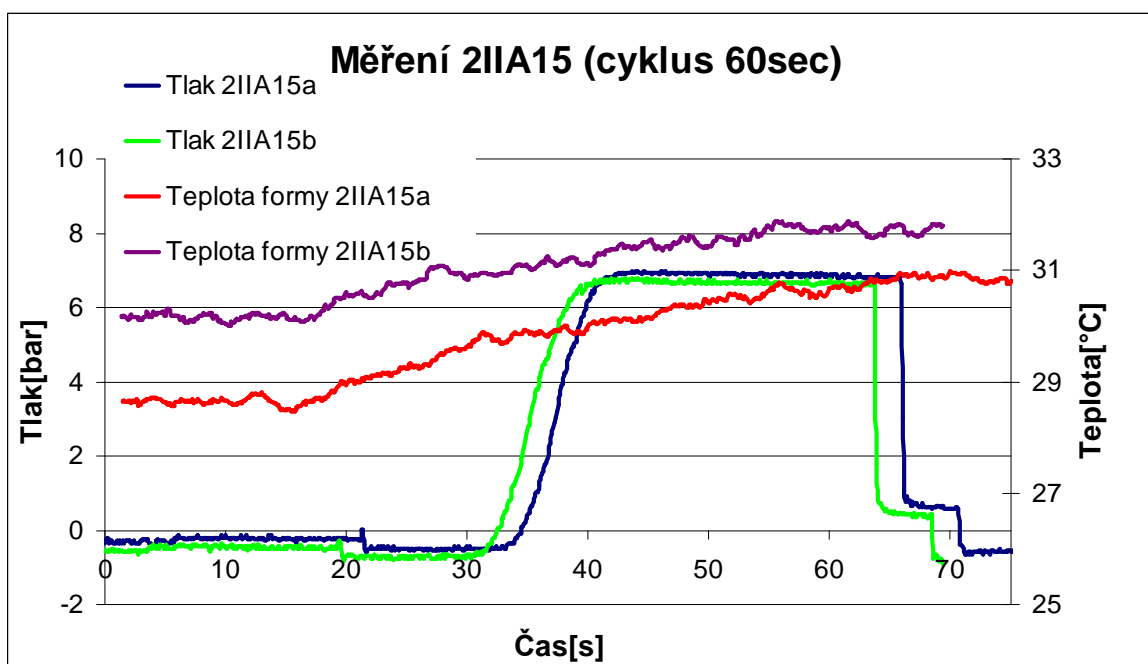
$p_n$  ... Naměřený tlak (bar)

$x$  ... Naměřená hodnota z tlakového čidla (V)

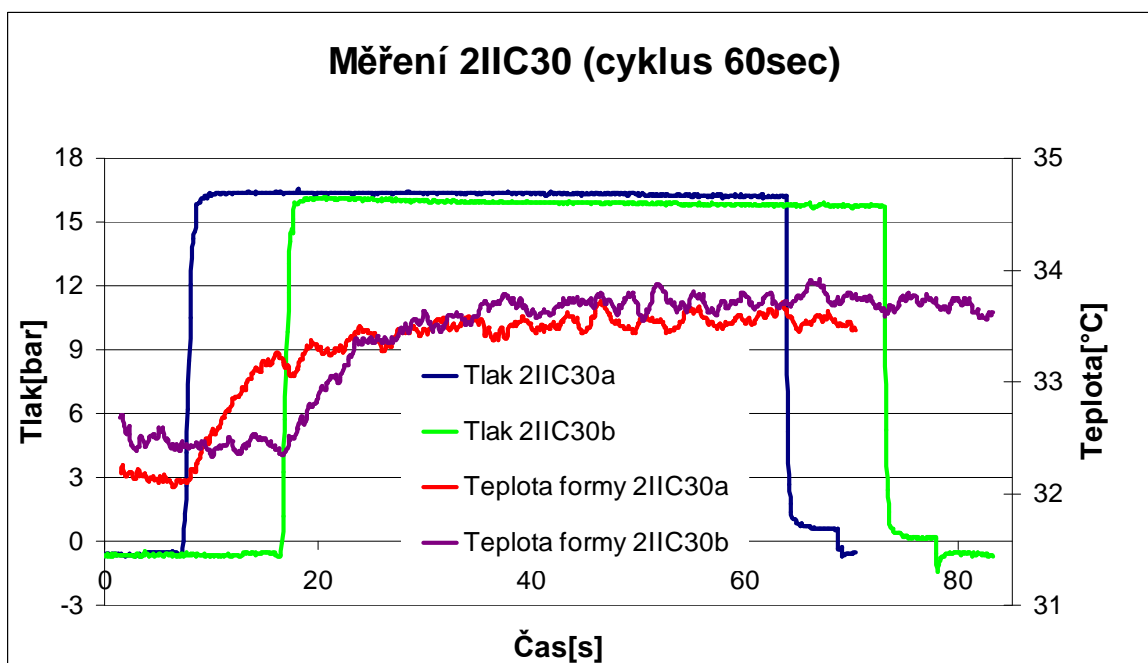
### 2.1.3 Vyhodnocení

Pro příklad získaných dat a jejich zpracování byly vybrány dva grafy a to Graf 2.1 a Graf 2.2. Tyto grafy byly vybrány z důvodu odlišnosti nastavení obou parametrů (pressure, flow). Při porovnání těchto dvou grafů je zřejmý rozdíl ve strmosti nástupu maximálního naměřeného tlaku. To je způsobeno rozdílnou rychlostí plnění dutiny testovací formy. Naměřená hodnota tlaku je také odlišná, což dokazuje, že nastavená hodnota parametru pressure má opravdový vliv na nastavený tlak a ventil tak pracuje jak má. Odlišnosti v posunutí průběhu tlaku jsou způsobeny rozdílným začátkem vstřikovacího cyklu od počátku měření. Na vyhodnocení toto posunutí nemá vliv. Z tohoto důvodu posunutí nebylo odstraněno a je ponecháno.

Zbylé vypracované grafy naměřených dat jsou přiloženy v příloze č. 1.

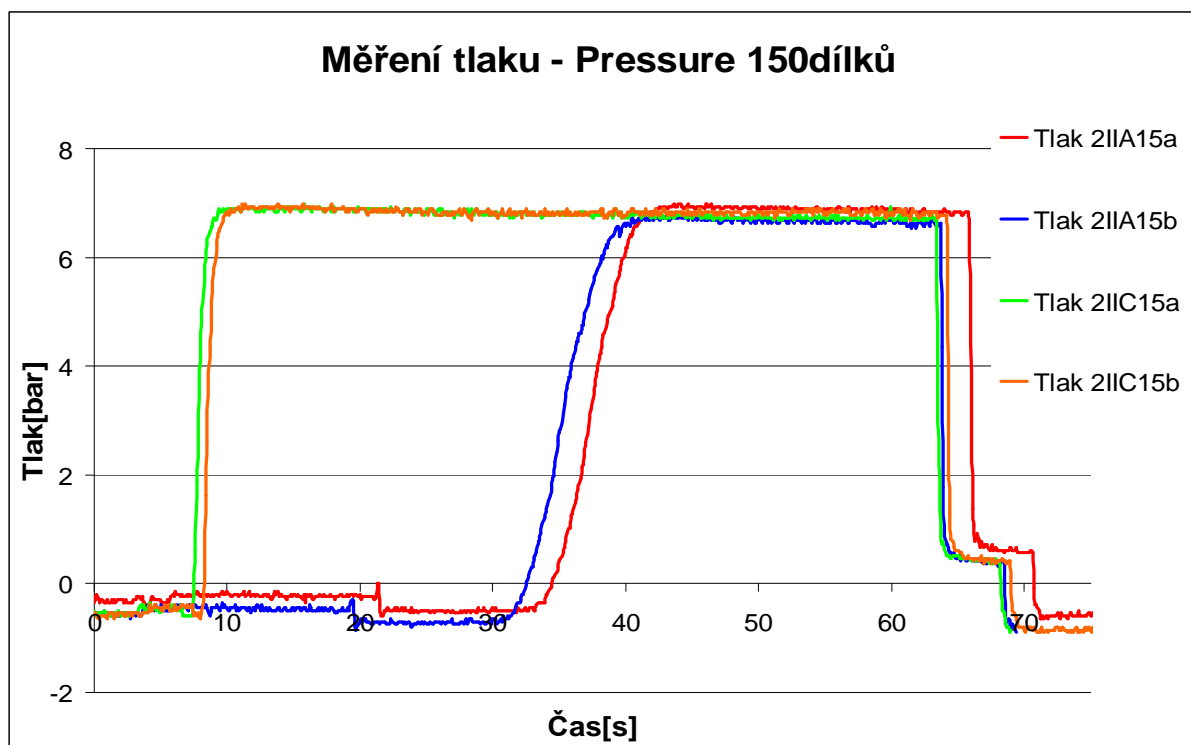


Graf 2.1 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIA15. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 150dílků.

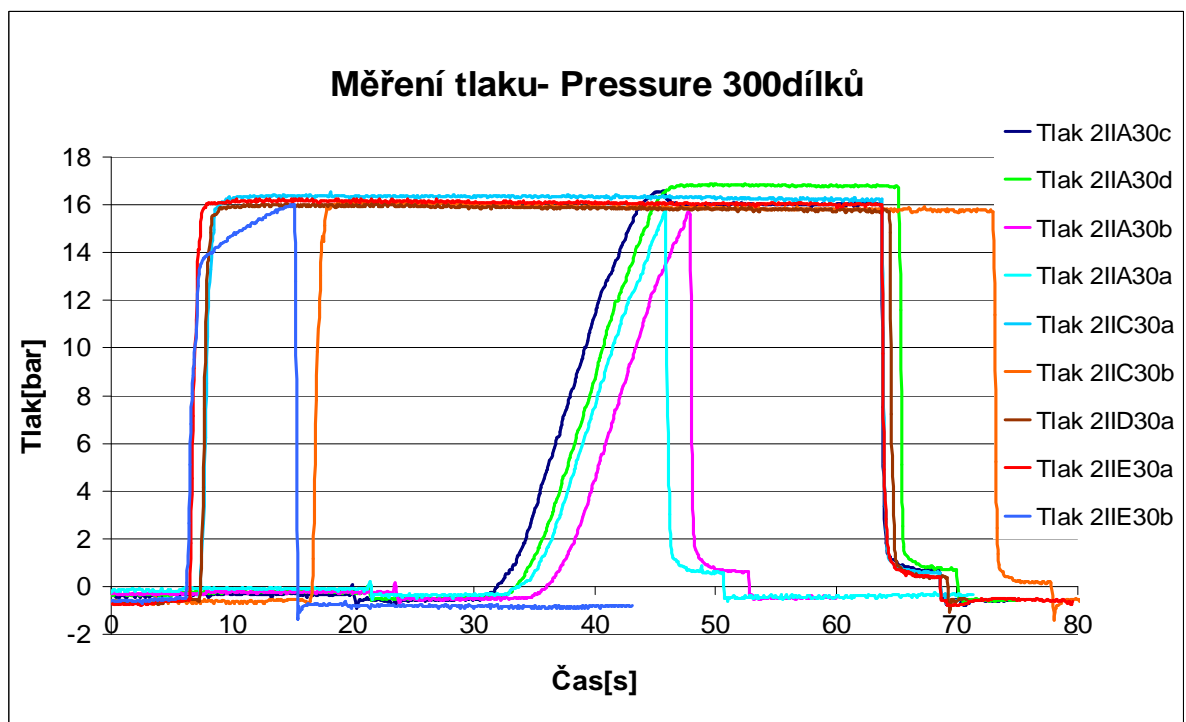


Graf 2.2 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIC30. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 300dílků a Pressure 300dílků.

Data z měření tlaku, která byla získána za stejného nastavení parametru pressure ale odlišného nastavení parametru flow, jsou vložena do společných grafů (viz. Graf 2.3 a Graf 2.4). Na těchto grafech je patrné, že naměřené hodnoty maximálního tlaku pro shodná nastavení parametru pressure jsou si velice podobné. A jak je zřejmé z hodnot tlaku v Tab. 2.4 jejich odchylka je minimální. Z těchto poznatků lze vyhodnotit nastavení parametru pressure vstřikolisu jako konstantní. To znamená, že velikost tlaku neovlivňuje nastavení parametru flow. Na velikost tlaku nemá vliv opakované nastavení vstřikovacích parametrů. To znamená, že vstřikolis nastavený na určitý počet dílků parametru pressure poskytuje vždy stejné hodnoty tlaku.



Graf 2.3 Záznam průběhů tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů Pressure 150dílků.



Graf 2.4 Záznam průběhů tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů Pressure 300dílků.

Z naměřených dat tlaku byla vyhotovena tabulka Tab. 2.4. V jednom sloupci jsou hodnoty parametru pressure v dílcích, další jsou přepočtené velikosti tlaku dle manuálu vstřikolisu a v posledních dvou sloupcích jsou maximální hodnoty naměřených tlaků v experimentálním měření.

Označení odstříku	Nastavený průtok (dílky)	Nastavený tlak (dílky)	Nastavený tlak (bar)	Naměřený tlak (bar)	Naměřený tlak 1dílek (bar)	Teplota formy (°C)
2IIA30a	150	300	11.58	15.78	0.053	24.2
2IIA30b	150	300	11.58	15.73	0.052	26.0
2IIA30c	150	300	11.58	16.59	0.055	27.9
2IIA30d	150	300	11.58	16.89	0.056	30.4
2IIA80a	150	800	30.89	38.73	0.048	30.4
2IIA15a	150	150	5.79	6.98	0.047	28.6
2IIA15b	150	150	5.79	6.78	0.045	30.2
2IIB32a	250	320	12.36	17.70	0.055	32.9
2IIB32b	250	320	12.36	17.70	0.055	33.7
2IC30a	300	300	11.58	16.54	0.055	32.2
2IC30b	300	300	11.58	16.18	0.054	32.4
2IIC15a	300	150	5.79	6.98	0.047	30.9
2IIC15b	300	150	5.79	6.98	0.047	31.4
2IID30a	350	300	11.58	16.03	0.053	33.4
2IIE30a	450	300	11.58	16.23	0.054	33.5
2IIE30b	450	300	11.58	15.98	0.053	33.5

Tab. 2.4 Naměřené hodnoty tlaků a teploty formy na počátku plnění.

Z naměřených dat vyplývá, že nastavená hodnota neodpovídá skutečné velikosti tlaku. Skutečná hodnota je ve všech měřeních vyšší a to v přibližném rozdílu 50dílků tlaku = + 0,5baru k vypočtenému tlaku dle manuálu vstříkolisu. K přesnějšímu odhadu předpokládaného nastavení parametru pressure lze využít vztah:

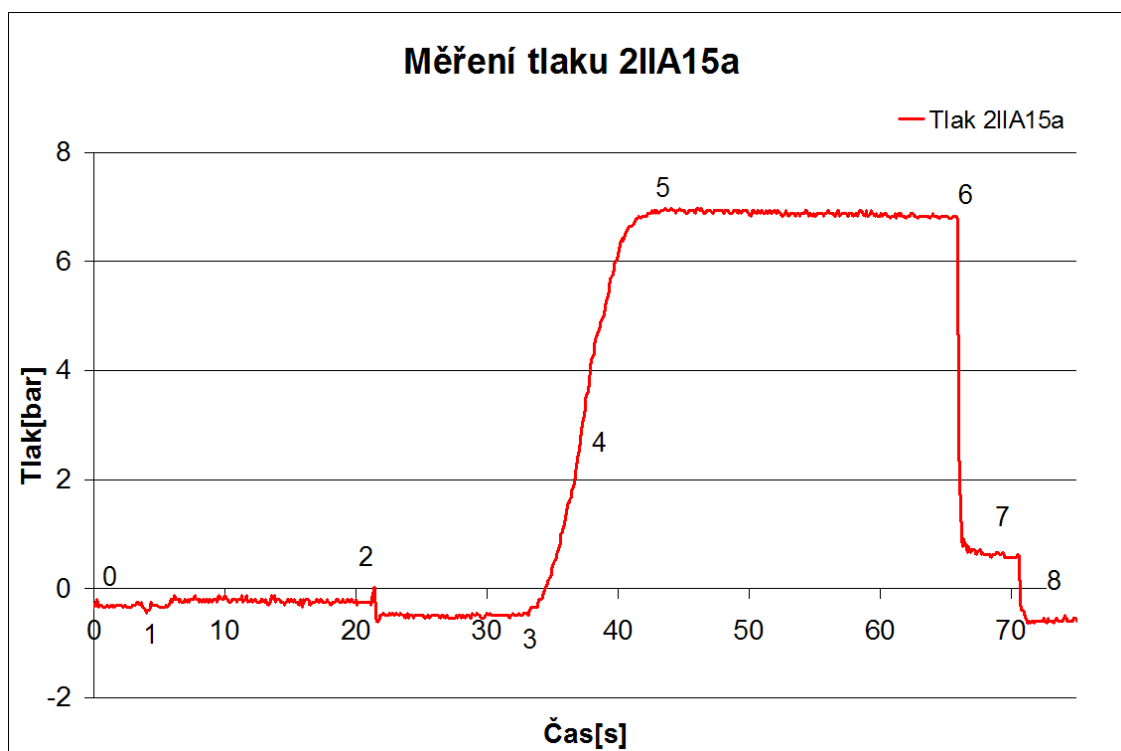
$$p_o = D * 0,051 \quad (3)$$

$p_o$  ... Odhadovaný nastavený tlak vstřikolisu (bar)

$D$ ... Počet nastavených dílků parametru pressure

### 2.1.3.1 Vzorový průběh tlaku

Z naměřených záznamů vyplývá, že průběh tlaku je u všech měření podobný (viz průběh tlaku na Graf 2.5).



Graf 2.5 Hlavní body reprezentativního průběhu plnění testovací formy II.

V bodě 0 je testovací forma umístěna na místě určeném pro odstříknutí formy na vstřikolisu. Následně je souběžně spuštěn záznam dat a video záznam. Po spuštění záznamů následuje zahájení vstřikovacího cyklu dle plánu měření Tab. 2.2. V bodě 1 se vosková směs objeví v testovací formě. V bodě 2 dochází ke kontaktu voskové směsi s tlakovým senzorem. V bodě 3 dochází k plnění klínové části testovací formy II a nárůstu měřeného tlaku. V bodě 4 je testovací forma II plná a nárůst tlaku nadále pokračuje. V bodě 5 je dosaženo

maximálního tlaku. Vstřikolis udržuje nastavený tlak do bodu 6. V bodě 6 dojde ke konci dotlaku. Tlak poklesne do bodu 7. V bodě 7 dojde k uvolnění formy od uzavírací desky a záznam se dostane do bodu 8. V bodě 8 následuje ukončení pořizování záznamů z čidel a kamery. Forma je vyjmuta ze vstřikolisu a přenesena na pracovní stůl, kde dochází k demontáži formy, vyjmutí modelu a přípravě formy na nový odstřík.

Na začátku plnění (mezi body 0-2) by měl být naměřený tlak roven nule. Jelikož zaznamenávaný tlak je měřen jako odchylka od atmosférického tlaku. Ale během experimentálního měření je zaznamenána odchylka od atmosférického tlaku v rozmezí -0.29 až -0.69 barů. Tato odchylka může být způsobena ztrátou napětí mezi měřícím čidlem a datovým převodníkem, jelikož tlakové čidlo vykazuje odchylku od atmosférického tlaku i při měření mimo testovací formu.

Mezi body 1-4 dochází k plnění dutiny testovací formy II. V bodě 2 dochází nejprve ke zvýšení tlaku. To je dáno prvním kontaktem tlakového čidla s voskovou směsí. Následuje mírný pokles tlaku. Tento pokles pravděpodobně souvisí s natuhnutím kůrky voskové směsi na tlakovém čidle. Dutina je dále zaplňována a dochází k plnění klínové části v bodě 3. Během plnění klínové části dochází k pozvolnému nárůstu tlaku. Tento tlak roste i po úplném naplnění testovací formy do doby než dosáhne nastavené hodnoty na vstřikolisu.

### **2.1.3.2 Odchytky naměřeného tlaku**

V každém z měření docházelo k vyboulení přední části plexiskla. To je dáno jeho nižší tuhostí, která nedosahuje hodnot hliníkových slitin použitých pro zbytek formy. Tato okolnost měla za následek prasknutí plexiskla v měření 2IIA80a. Nastavení vstřikovacích podmínek bylo koncipováno podle poznatků z minulých měření, kde shodné nastavení vydrželo. Pro měření byl použit ovšem jiný vstřikolis se stejnými parametry vstřikování. Jedinou odlišností vstřikolisu byla uzavírací síla (35tun původní, 60tun použitá). Během měření 2IIA80a došlo k naplnění dutiny, následnému vyboulení plexiskla působením tlaku, které mělo za následek netěsnost ve formě. Následně došlo k prasknutí plexiskla.



Obr. 2.2 Detail prasklého plexiskla

V měření 2IIA30c (viz Graf P1.2) došlo k poklesu tlaku po dosažení maximální hodnoty. Tento pokles nastal z důvodu uvolnění drátku zacpávajícího mezeru pro teplotní čidlo. Proto pokles průběhu tlaku se nebere jako významný.

V měření 2IIA80a (viz Graf P1.6) po dosažení maximálního naměřeného tlaku došlo k úniku voskové směsi mimo dutinu testovací formy II. Po začátku úniku voskové směsi následně došlo k prasknutí čelního plexiskla. Tento okamžik je patrný na průběhu tlaku náhlou změnou tlaku.

V měření 2IIE30b došlo k špatnému umístění testovací formy II a od začátku plnění dutiny formy docházelo i k úniku voskové směsi mimo formu. Tento problém je zřejmý na Graf P1.10, kde došlo k pozvolnějšímú nástupu tlaku než v měření 2IIE30a, které bylo pořízeno za stejného nastavení (viz Graf P1.9).

Ve zbylých měřeních nebyly zjištěny odchylky od vzorového průběhu tlaku (viz Graf 2.5). Průběhy tlaků a maximální hodnoty jsou shodné až na nepatrné



odchylky ve všech měřeních, které byly pořízeny za stejných vstřikovacích podmínek.

#### **2.1.4 Shrnutí**

Z experimentálních měření na testovací formě II bylo zjištěno, že hodnota tlaku pro numerickou simulaci může být zadaná jako konstantní hodnota. To je způsobeno průběhem tlaku naměřeného v experimentálním měření (viz. Graf 2.5). Během celého vstřikovacího cyklu vstřikolis udrží konstantní tlak po dosažení maximální hodnoty. Rychlost nástupu je ovlivněna pouze rychlostí zaplnění dutiny formy. Tento průběh tlaku je shodný s růstem tlaku v simulačním softwaru, kde dochází k nástupu tlaku dle nastavení. Doba pro nástup tlaku byla doporučena dodavatelem softwaru na hodnotu 98-99% zaplnění dutiny formy.

Také bylo zjištěno, že nastavená hodnota tlaku neodpovídá skutečné velikosti. Byl stanoven vztah pro přesnější určení hodnoty tlaku z nastaveného parametru pressure. (viz rovnice 3).

Pro tvorbu numerické simulace byly tak stanoveny maximální hodnoty tlaku a počáteční teploty formy. Hodnota parametru flow neovlivňuje parametr pressure a to je ve shodě s tvrzením výrobce vstřikolisu.

## **2.2 Záznam průběhu plnění testovací formy II**

K validaci numerické simulace je nezbytné získat průběh plnění matečné formy. K tomuto byla navržena testovací forma II viz kapitola 1.3.4. Snímky získané z experimentálního měření jsou určeny k následnému porovnání s numerickou simulací, bez kterého nelze určit pravdivost této simulace.

### **2.2.1 Postup měření**

Pro zaznamenávání průběhů plnění testovací formy II byla použita digitální kamera Canon LEGRIA HF R26. Video záznam byl spuštěn souběžně se záznamem z měřících čidel tlaku a teploty. Poté byl v co nejkratším časovém intervalu spuštěn vstřikovací cyklus vstřikolisu. Pořizování dat bylo ukončeno po dokončení vstřikovacího cyklu. Bylo pořízeno 16 digitálních záznamů průběhů

plnění testovací formy viz Tab. 2.2. Postup měření již byl jednou podrobněji popsán v kapitole 2.1.1

### **2.2.2 Podklady k validaci numerické simulace**

Pro zpracování záznamů plnění byla videa převedena v softwaru AVS Video Converter 7.0 na formát XVID, který je kompatibilní se softwarem pro nastříhání videa. Videa byla nastříhána v softwaru VirtualDub 9.0.1 na jednotlivé snímky (framy). Jedna vteřina záznamu z videokamery umožňovala získat 25 snímků. Jeden snímek pak představuje časový interval 25/100 vteřiny.

Pro porovnání jednotlivých odstříků, které byly zaznamenány při shodném nastavení parametru FLOW, byly zvoleny shodné časové úseky z průběhu plnění. Pro nastavení parametru FLOW = 150 dílků to byly časové úseky: 0,04s; 7,00s; 11,52s; 20,04s; 24,20s; 27,00s; 27,76s. Pro nastavení parametru FLOW = 300 dílků to byly časové úseky: 0,04s; 0,60s; 0,96s; 1,44s; 1,76s; 2,00s. Pro nastavení parametru FLOW = 250 dílků to byly časové úseky: 0,04s; 0,92s; 1,72s; 2,40s; 2,96s; 3,32s; 3,52s. Pro nastavení parametru FLOW = 350 dílků to byly časové úseky: 0,04s; 0,40s; 0,96s; 1,16s; 1,36s; 1,56s. Pro nastavení parametru FLOW = 450 dílků to byly časové úseky: 0,04s; 0,40s; 0,60s; 0,84s; 1,00s; 1,16s. Na prvním snímku, který představuje časový úsek 0,04s, je zobrazeno objevení voskové směsi v dutině testovací formy II.

Tyto časové okamžiky byly voleny s ohledem na následnou validaci numerické simulace. Na snímcích byly zaznamenány okamžiky, ve kterých zaujímá vosková směs určitý tvar nebo dosahuje určitého místa v dutině formy. Tento postup byl zvolen z důvodu co nejpřesnějšího porovnání s výsledky numerické simulace. Jelikož k porovnávání získaných záznamů z experimentálního měření a obrázků z numerické simulace dochází pomocí subjektivního hodnocení podobnosti těchto snímků.

Takto získané průběhy plnění jsou přiloženy k diplomové práci jako příloha č.2.

### 2.2.3 Vyhodnocení

Hodnocení záznamu plnění bylo provedeno ve dvou úrovních. První porovnání záznamů probíhalo pro jednotlivá měření, která byla pořízena za stejných vstřikovacích podmínek. To znamená, že byly porovnávány záznamy „a“ a „b“. Další částí porovnávání bylo srovnání výsledků pořízených za stejného průtoku ale jiného tlaku.

Do tabulky Tab. 2.5 byly vloženy zaznamenané časy plnění. Tyto časy byly zjištěny z jednotlivých snímků záznamů. A to určením prvotního objevení voskové směsi a poslední znatelnou změnou tvaru voskové směsi na videozáznamu. Čas plnění byl ještě upraven o hodnotu přerušení plnění voskové směsi, ke které došlo v každém měření.

Ze získaných časů plnění byl dopočítán průměrný průtok voskové směsi. A to na základě znalosti objemu dutiny formy.

$$Q_v = V / t \quad (4)$$

$Q_v$  ... Objemový průtok ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

$V$  ... Objem dutiny formy ( $\text{cm}^3$ )

$T$  ... Čas plnění dutiny formy (s)

Z těchto průměrných průtoků byla dopočítána hodnota odpovídající jednomu dílku parametru flow. Z takto zpracovaných dat je zřejmé, že parametr flow není lineárně závislý. Nejde tedy stanovit jednoduchý vztah, který by usnadnil odhad reálného průtoku na základě nastavení parametru flow.

Označení odstříku	Nastavený tlak (dílký)	Nastavený průtok (dílký)	Čas plnění (s)	Vypočtený průtok (cm <sup>3</sup> /s)	Vypočtený průtok 1dílek (cm <sup>3</sup> /s)
2IIA30a	300	150	29.56	12.43	0.08
2IIA30b	300	150	29.80	12.33	0.08
2IIA30c	300	150	29.64	12.40	0.08
2IIA30d	300	150	29.72	12.36	0.08
2IIA80a	800	150	28.76	12.77	0.09
2IIA15a	150	150	29.80	12.33	0.08
2IIA15b	150	150	29.64	12.40	0.08
2IIB32a	320	250	3.68	99.84	0.40
2IIB32b	320	250	3.68	99.84	0.40
2IC30a	300	300	2.24	164.02	0.55
2IC30b	300	300	2.24	164.02	0.55
2IIC15a	150	300	2.80	131.21	0.44
2IIC15b	150	300	2.76	133.12	0.44
2IID30a	300	350	1.72	213.60	0.61
2IIE30b	300	450	1.28	287.03	0.64
2IIE30c	300	450	-	-	-

Tab. 2.5 Nastavení experimentálního měření a vypočítané hodnoty průtoku voskové směsi v matečné formy získané na základě pořízených video záznamů.

### 2.2.3.1 Vzorové průběhy plnění

Všechna měření s nastaveným parametrem flow 150 (označení A) měly shodný průběh plnění (viz Obr. 2.3), ve kterém dochází k prvotnímu plnění hlavní části dutiny. Vosk postupoval směrem k horní části formy rychleji nejobemnější částí dutiny, která se nachází na levé straně pořízených snímků. Vosk, který postupuje užší částí dutiny, postupuje pomaleji. To je způsobeno

plněním otvorů což má za následek i znatelnou změnu tvaru průběhu plnění. Vosk ve střední části dutiny zasahuje do okraje klínové části, kde dochází k jeho zatuhnutí. Plnění probíhá stejným způsobem do doby, kdy se naplní hlavní část dutiny. Potom dochází k doplnění střední části. V okamžiku, kdy dojde k zaplnění i střední části vosk začíná proudit vrchní částí dutiny. To je způsobeno zatuhnutím voskové směsi do úrovně míst určených pro termočláanky. Vosk následně doplňuje zbylý objem dutiny od vrchní části dutiny, kde vosk ještě nezatuhl. Vosk v celé délce nezaběhne a ve všech pořízených záznamech má stejný tvar (viz Obr. 2.4).

**2IIA30b**

Čas 0.04s(10937)



Čas 7.00s(11144)



Čas 11.52s (11257)



Čas 20.04s (11470)



Čas 24.20s (11574)



Čas 27.00s (11644)



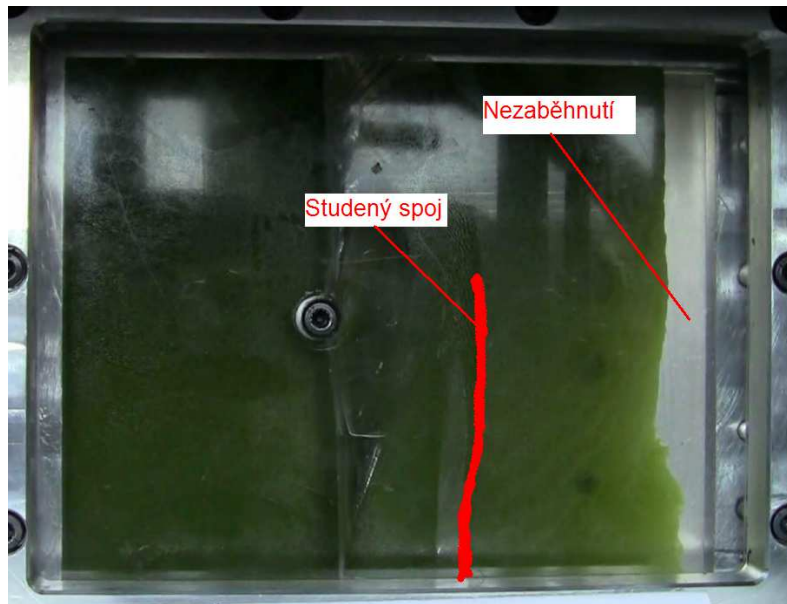
Čas 28.76s (11688)



Čas 29.80s (11714)



Obr. 2.3 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIA30b. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.

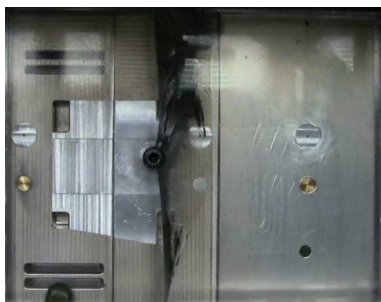


Obr. 2.4 Studený spoj a nezaběhnutí měření s nastaveným parametrem Flow 150dílků.

Průběh plnění zbylých nastavení pro parametr flow (B až E viz Tab. 2.5) lze hodnotit jako shodný s průběhem zobrazeným na Obr. 2.5. Tvar průběhu plnění si odpovídá, ale dochází k odlišnosti v čase plnění. Průběh plnění dutiny začíná ve shodě s plněním pro nastavení parametru flow 150dílků. To znamená, že dochází k plnění dvou hlavních částí. Tvar průběhu plnění není tolik ovlivněn plněním dutin formy. To je způsobeno větší rychlostí voskové směsi. Větší rychlost voskové směsi znamená, že je zaznamenán větší průtok. To má za následek zkrácení času plnění voskové směsi do dutiny formy. Po postupném zaplnění střední části dutiny dojde k rovnoměrnému plnění klínové části po celé délce dutiny. Tato odlišnost oproti prvnímu příkladu je způsobena tím, že vosková směs nebyla dostatečně ochlazená, aby mohl vzniknout studený spoj pozorovaný u první skupiny měření.

## 2IC30a

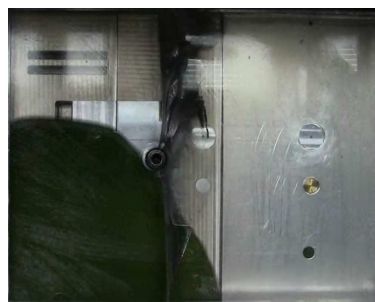
Čas 0.04s(70091)



Čas 0.60s(70138)



Čas 0.96s (70147)



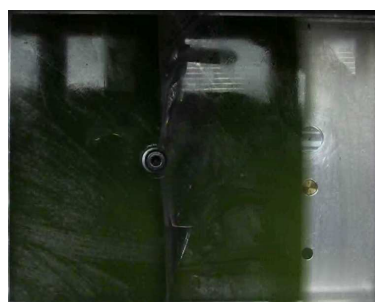
Čas 1.44s (70159)



Čas 1.76s (70167)



Čas 2.00s (70173)



Čas 2.24s (70179)



Obr. 2.5 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIC30a. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.

### 2.2.3.2 Odchytky průběhu plnění

Z šestnácti pořizovaných záznamů šlo použít pro tvorbu podkladů k validaci numerické simulace pouze patnáct. Jeden záznam průběhu plnění byl spuštěn po zaplnění dutiny formy. Bylo to způsobeno ukládáním předchozího záznamu na paměťovou kartu. Na každém z patnácti pořizovaných záznamů je zjevné přerušení plnění voskové směsi do testovací formy II. Toto přerušení plnění je



v každém případě stejně dlouhé a to 1,2 sekundy. Toto přerušení je s největší pravděpodobností způsobeno zbytky vosku z předchozího vstřikovacího cyklu. Vosk během vstřikovacího cyklu je tlačěn do dutiny formy tryskou vstřikovacího lisu. Po ukončení vstřikovacího cyklu dojde k poklesu vosku zpět do trysky. Vosk, který přišel do kontaktu s formou, má nižší teplotu a může být příčinou přerušeného plnění.

U měření 2IIC30 bylo zaznamenáno rychlejší plnění (0,56 sec viz Tab. 2.5) než u měření 2IIC15, které byly provedeny za stejného nastavení parametru flow a to 300 dílků. Proto by měly časy plnění odpovídat jeden druhému. Toto může být způsobeno závislostí parametru flow na parametru pressure. Drobné rozdíly v plnění byly zaznamenány také u měření s nastavením parametru flow 150 dílků (viz časy plnění v Tab. 2.5). ale z důvodu malého průtoku byly odchylky malé a nelze je interpretovat jako závislost parametru flow na nastaveném parametru pressure. Pro potvrzení tohoto tvrzení by bylo potřeba udělat opakované měření pro větší množství nastavení jak parametru flow tak parametru pressure.

Nové měření by však mělo být provedeno na objemově větší formě. To z důvodu možnosti proměření většího rozsahu průtoku a získání přesnějších výsledků. Výsledky měření na testovací formě II jsou ovlivněny velikostí formy. Testovací forma má objem  $367,4 \text{ cm}^3$  což pro proměření vyšších hodnot průtoku není dostatečné.

#### **2.2.4 Shrnutí**

Měření bylo provedeno za účelem získání záznamu průběhu zaplňování dutiny testovací formy II. Ze záznamů byly vytvořeny snímky, které budou použity v další části diplomové práce pro validaci výsledků numerické simulace získaných z programu Cadmould 3D-F.

U všech záznamů označených A došlo ke vzniku studeného spoje v klínové části testovací formy II a také k nezaběhnutí dutiny. U zbylých záznamů došlo k úplnému zaběhnutí voskové směsi a nebyly predikovány vady.

Ze získaných videozáznamů je zřejmé, že velikost průtoku voskové směsi není lineárně závislá na nastaveném parametru flow, proto nelze bez měření pro dané nastavení vstřikolisu odhadnout velikost průtoku.

Z experimentálního měření vyplývá, že vstřikolis pracuje jen s minimálními odchylkami v jednotlivých vstřikovacích cyklech se stejným nastavením parametrů. To znamená, že průběh zaplňování dutiny formy se v každém odstříku shoduje. Také čas plnění je pro jednotlivé odstříky shodný.

Pro validaci numerické simulace budou použity záznamy z měření označené jako „a“. To znamená první měření pro dané vstřikovací podmínky. Vypočítané časy plnění lze použít v simulačním softwaru. Po jejich zadání do simulačního softwaru je automaticky dopočítán průtok voskové směsi.

### **2.3 Měření průtoku voskové směsi**

Důležitý parametr, který se na vstřikolisu nastavuje je parametr flow. Tento parametr udává velikost průtoku voskové směsi, která je vstřikována do matečné formy. Velikost průtoku voskové směsi by měla být ovlivněna pouze parametrem flow. Z tohoto důvodu je měření naplánováno pro různé nastavení parametrů pressure tak i flow. Takto provedené měření poskytne informace o závislosti průtoku voskové směsi nejen s ohledem na nastavený parametr flow, ale také na parametru pressure.

#### **2.3.1 Cíle měření**

Hlavním cílem měření je ověřit funkčnost ventilu pro nastavení parametru flow. Na použitém vstřikolisu došlo k výměně této součásti před uskutečněním tohoto měření.

Dalším cílem je stanovit závislost průtoku voskové směsi na nastaveném parametru flow pro daný vstřikolis. Velikost průtoku voskové směsi nemusí být konstantní hodnota. Odchylky od hodnot průtoku mohou být způsobeny nepřesností chodu vstřikolisu. Z tohoto důvodu je potřeba provést měření nejen průměrných hodnot průtoku voskové směsi, ale také průtoku v jednotlivých časových okamžicích vstřikovacího cyklu. Takto zpřesněná hodnota průtoku voskové směsi by umožnila přesnější nastavení numerické simulace.

### 2.3.2 Experimentální měření průtoku

Měření probíhalo ve slévárně Fimes a.s. společnost skupiny Mesit. Tato společnost má sídlo v Uherském Hradišti. Postup měření probíhal dle Tab. 2.6. Každé měření bylo provedeno vždy dvakrát pro jedno nastavení vstřikolisu.

Označení odstříku	Nastavený průtok (dítky)	Nastavený tlak (dítky)	Nastavená teplota (°C)	Změřená teplota (°C)
<b>IIA1a</b>	150	100	64	
<b>IIA1b</b>	150	100	64	
<b>IIA5a</b>	150	500	64	
<b>IIA5b</b>	150	500	64	
<b>IIB1a</b>	300	100	64	
<b>IIB1b</b>	300	100	64	
<b>IIB5a</b>	300	500	64	70.5
<b>IIB5b</b>	300	500	64	70.5
<b>IIC1a</b>	450	100	64	
<b>IIC1b</b>	450	100	64	
<b>IIC5a</b>	450	500	64	69
<b>IIC5b</b>	450	500	64	70
<b>IIE25a</b>	450	250	64	70
<b>IIE25b</b>	450	250	64	69
<b>IID25a</b>	300	250	64	69.5
<b>IID25b</b>	300	250	64	69.5

Tab. 2.6 Nastavení měření nastavitelného parametru „flow“ a změřené teploty vosku.

### **2.3.2.1 Vybavení pro měření průtoku**

K experimentálnímu měření bylo použito následující vybavení:

#### **Vstříkolis**

K měření byl vybrán vstříkolis Shell-O-Matic 35T-20/28 na kterém jsou vyráběny drobnější voskové modely ve spolupracující slévárně. Na vstříkolisu se nachází ventil, který lze nastavovat na rozmezí hodnot 0-1000 dílků. Toto rozmezí nastavení odpovídá rozmezí 0-30litrů voskové směsi za minutu. Tlak se dá nastavit v rozmezí 0-2000dílků. Dílky odpovídají hodnotě tlaku v jednotkách psi po vynásobení počtu dílků konstantou 0,56. [21]

#### **Váha**

K měření byla použita váha Shinko Denshi SJ 4200 CE s rozlišení 0,1 g a maximální možnou měřenou váhou 4200gramů.

#### **Redukční kabel**

K propojení použité váhy a notebooku bylo zapotřebí použít redukčního kabelu z koncovky RS 232/C na USB. Délka tohoto kabelu je 1,8m.

#### **Průtočná forma**

K experimentálnímu měření musela být navržena průtočná forma. Tato forma zajišťuje transport voskové směsi z trysky vstříkolisu do nádoby určené pro zachycení vosku. Tato forma byla vyrobena z duralu. Do složené průtočné formy je zašroubovaná koncovka určená pro napojení pryžové hadice. Průtočná forma je zobrazena na Obr. 2.6.

#### **Pryžová hadice**

Vosková směs proudící průtočnou formou musí být usměrněna do nádoby určené pro zachycení vosku.

### Teplotní čidlo

Pro měření teploty voskové směsi bylo použito teplotní čidlo GTH 175/Pt-E. Čidlo umožňuje měření v rozsahu  $-199,9^{\circ}\text{C}$  až  $+199,9^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

### Zbylé vybavení

Pro záznam naměřené hmotnosti byl použit notebook se softwarem pro záznam měření. Pro měření také byla nezbytná nádoba na zachycení vosku, která měla objem 10litrů. Dle parametrů vstřikolisu by dostačovala nádoba o objemu 5litrů, ale kvůli rozstříku vosku byla zvolena nádoba s větším objemem.

#### 2.3.2.2 Postup měření

Před začátkem měření byly zaznamenány hodnoty teplot jednotlivých částí vstříkovací soustavy (viz Tab. 2.7).

Místo	Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )
Zásobník - vzduchu	70
Zásobník - střed	73
Zásobník - spodek	65
Uzávěr vzduchu	64
Vstříkovací válec	64
Vedení vosku - spodek	64
Blok trysky	64
Trysky - spodek	64

Tab. 2.7 Nastavené teploty na vstřikolisu

Prvním krokem k získání hodnot průtoku voskové směsi je zapojení měřicí soustavy. Po zapojení měřicí soustavy je potřeba provést nastavení měřicího programu. V programu se nastavují požadovaná data a způsob ukládání pro další zpracování. Váha použitá pro měření je potřeba také nastavit. Pro experimentální měření bylo použito nastavení, při kterém váha poskytovala hodnoty v gramech. Použitá váha umožňovala získávat maximálně 6 údajů za sekundu.



Obr. 2.6 Uspořádání experimentu měření „FLOW“. Vpravo – otevřená průtočná forma s pryžovým výstupem do měřící nádoby [19]

Dalším krokem každého měření bylo nastavení vstřikovacích parametrů dle plánu měření (viz Tab. 2.6).

Po nastavení vstřikovacích podmínek je sestavena průtočná forma a ta je následně umístěna na pracovní plochu vstřikolisu. Na pracovním stole byla usazena na vtokový otvor. K umístěné průtočné formě byla připevněna pryžová hadice, která byla přidána za účelem usměrnění voskové směsi do nádoby zachycující vosk.

Měření pokračovalo umístěním nádoby určené pro zachycení vosku na měřicí váhu. Před zahájením měření byla pozice průtočné formy ustálena přítlačnou deskou vstřikolisu.

Následným krokem bylo samotné spuštění záznamu měřícího programu. Po spuštění záznamu dat byl uveden vstřikolis do provozu. Vstřikovací cyklus byl nastaven na dobu 90sekund. Tato hodnota odpovídala měřením pro nízké hodnoty průtoku. Pro vyšší hodnoty byl vstřikovací cyklus ukončován ručně. To bylo zapříčiněno tím, že použitá váha umožňovala získání měřené hmotnosti do 4kg. Po překročení této hmotnosti váha přestává měřit, proto je pokračování v měření zbytečné.

Překročení maximální měřitelné hmotnosti nebo dokončení vstřikovacího cyklu bylo signálem pro ukončení pořizování záznamu hmotnosti.

Následovalo uvolnění průtočné formy od přitlačné desky vstřikolisu. Po jejím uvolnění byla odňata pryžová hadice a průtočná forma byla rozebrána za účelem odstranění voskové směsi z vtokové soustavy. Pryžová hadice byla uložena na nádobu s ledem určeným k rychlejšímu zchlazení voskové směsi. Po zchlazení voskové směsi byla tato směs odstraněna z pryžové hadice.

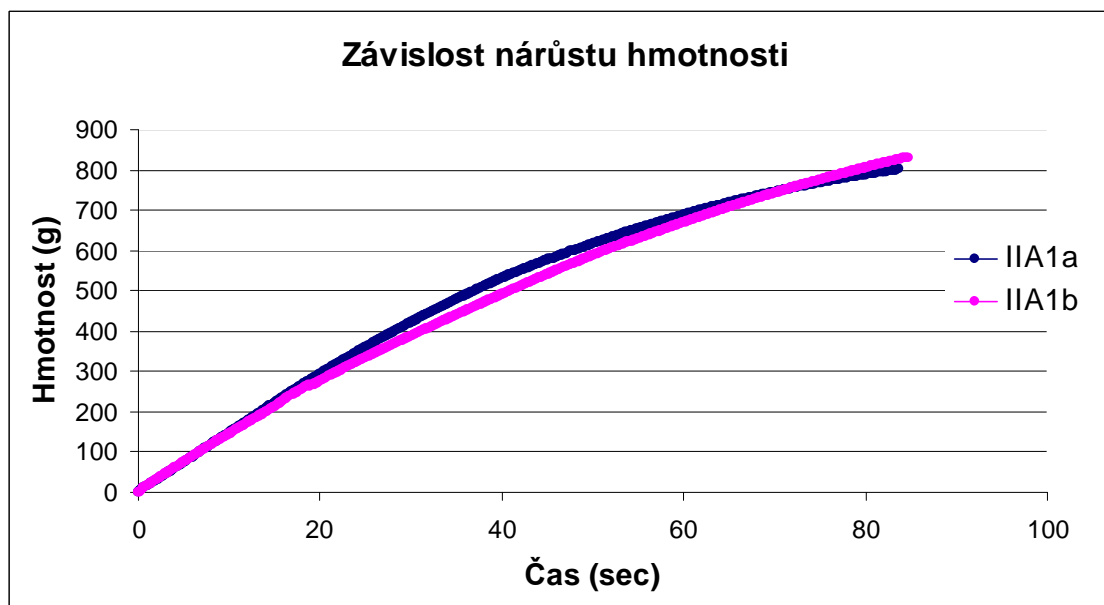
V nádobě se zachyceným voskem bylo provedeno měření teploty voskové směsi. Toto měření bylo uskutečněno jen u vybraných ostřiků, jelikož u nižších průtoků došlo k značnému ochlazení voskové směsi vlivem doby vstřikovacího cyklu a malého množství voskové směsi v nádobě. Měření bylo provedeno ponořením teplotního čidla do voskové směsi. Z důvodu natuhnutí povrchové vrstvy na teplotním čidle bylo potřeba provádět neustálý pohyb čidla. Toto opatření eliminovalo zkreslení výsledků.

Nádoba se zachyceným voskem byla po naměření teploty rovněž umístěna na nádobu s ledem. Po dostatečném ztuhnutí byl vosk odstraněn z této nádoby a celý cyklus měření se opakoval pro nové nastavení vstřikovacích parametrů.

### **2.3.2.3 Vyhodnocení naměřených dat**

Záznamy z digitální váhy byly převedeny a zpracovány v tabulkovém kalkulátoru Excel. V něm byly zhotoveny grafy závislosti změny hmotnosti na čase. Simulační software umožňuje zadat hodnoty průtoku voskové směsi v hmotnosti ( $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ) nebo objemu ( $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ). Proto byly vyhotoveny grafy zobrazující průtok voskové směsi v ( $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ) v závislosti na čase. Zhotovené grafy z naměřených dat jsou přiloženy v příloze číslo 3.

První skupinu výsledků tvoří grafy naměřené hmotnosti v daném čase. Do práce byly zvoleny následující grafy jako příklad těchto výsledků. Graf 2.6 a Graf 2.7 byly vybrány z důvodu odlišného nastavení parametru flow.

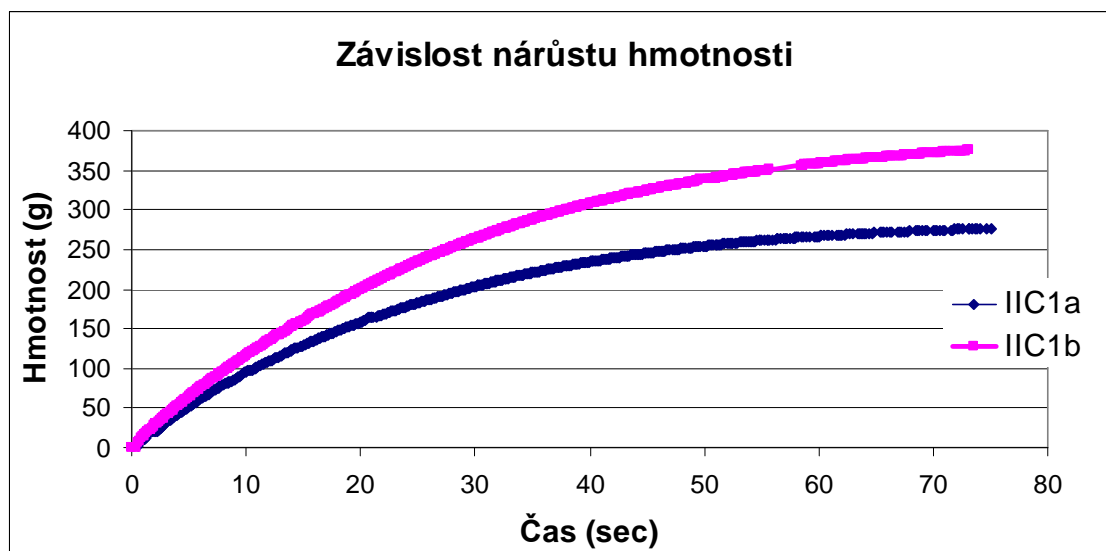


Graf 2.6 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIA1. Provedeny dvě opakovaná měření při nastavení FLOW – 150dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

Podle předpokladů měření měl být naměřený průtok pro měření IIC1 (viz Graf 2.7) třikrát větší než u měření IIA1 (viz Graf 2.6). To by platilo za předpokladu, že průtok voskové směsi je ovlivněn pouze nastaveným parametrem flow, u kterého se mění skutečná hodnota průtoku lineárně s nastaveným parametrem flow. Po porovnání výsledků měření IIA1 a IIC1 je zřejmé, že průtok voskové směsi se neměnil dle očekávání. Naopak u měření IIC1 byl zaznamenán nižší průtok než u měření IIA1 (viz Tab. 2.8). Graf 2.7 byl vybrán také z důvodu značného rozdílu naměřených dat u jednotlivých odstříků. Tato odchylka v měření je přičítána přerušení plnění, které bylo popsáno v kapitole 2.2. Přerušení plnění má za následek natuhnutí voskové směsi ve vtokové soustavě. Natuhnutý vosk přicpe vtokový kanál a to znepresnění naměřená data.

Na tvaru těchto grafů je také zřejmé, že vosková směs neproudí konstantní hodnotou, ale s rostoucím časem hodnota průtoku klesá.

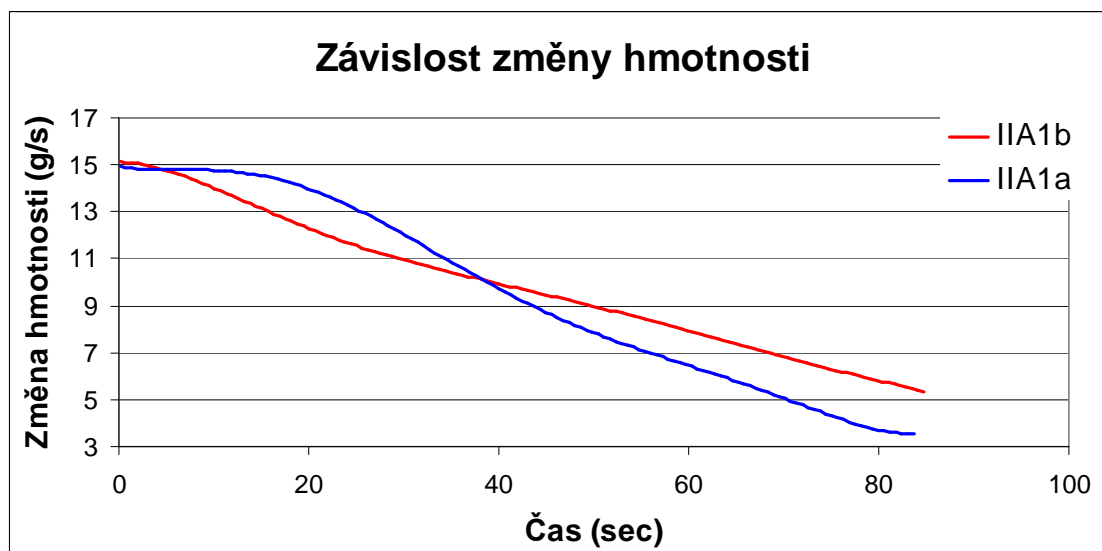




Graf 2.7 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIC1. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 450dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

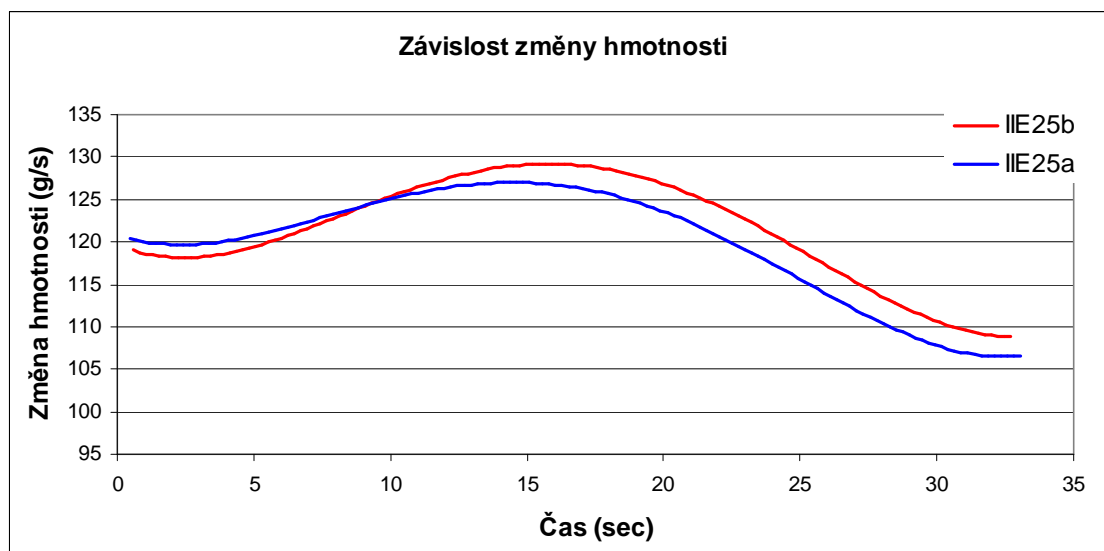
Druhou skupinou výsledků jsou grafy zobrazující změny hmotnosti v závislosti na čase. Data byla takto zpracována z důvodu použití těchto průběhů pro přesnější zadání průběhu průtoku v numerické simulaci.

Jako příklad této skupiny výsledků bylo vybráno měření IIA1 (viz Graf 2.8) a měření IIE25 (viz Graf 2.9). Měření IIA1 bylo vybráno z důvodu jeho popsání i v předchozí skupině výsledků. Měření IIE25 bylo vybráno pro ukázkou výsledků s větším průtokem voskové směsi.



Graf 2.8 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIA1. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 150dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

Na Graf 2.8 lze pozorovat průtok voskové směsi, který postupem času lineárně klesá. Odchytky v jednotlivých odstřicích mohou být způsobeny rozdílnou teplotou průtočné formy. Měření také ovlivňuje jev pozorovaný v kapitole 2.2. Jednalo se o přerušení plnění, které trvalo 1,2 sekundy. Toto přerušení může mít za následek částečné ucpání vtokové soustavy. Měření také značně ovlivňuje skutečnost, že průtočná forma není temperovaná a má přibližně teplotu okolí. Nízká teplota formy má za následek tuhnutí voskové směsi ve vtokové soustavě. Stejný vliv na průtok má i pryžová hadice použitá pro toto měření.

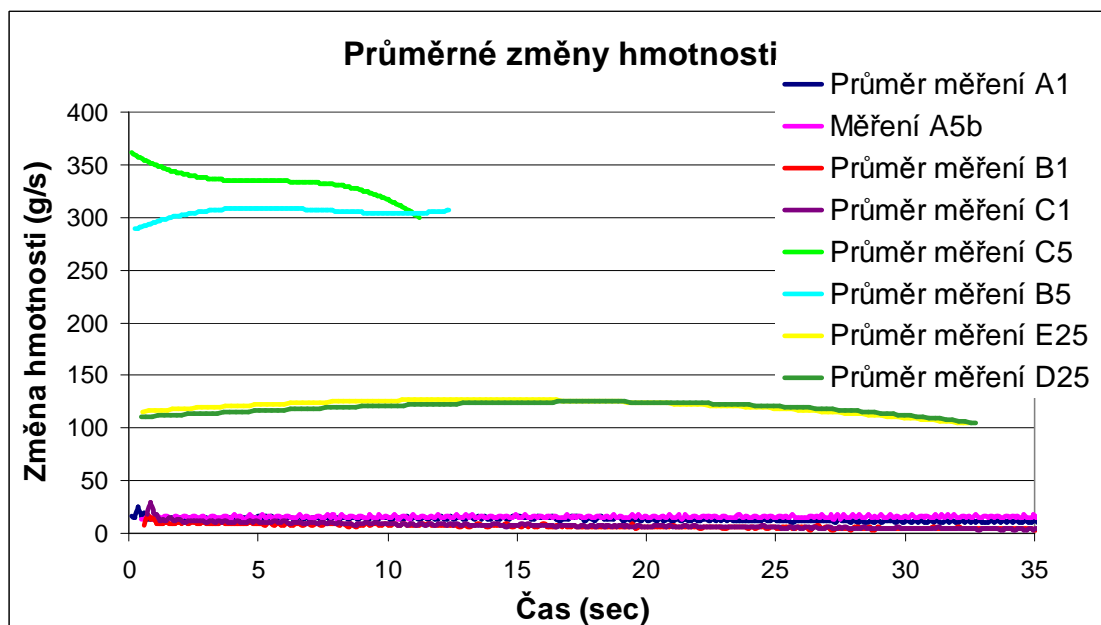


Graf 2.9 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIE25. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 450dílků, PRESSURE – 250dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

Vliv tuhnutí voskové směsi v průtočné formě a pryžové hadici je zřetelně pozorovatelné ve všech měřeních s výjimkou měření s nastaveným parametrem pressure na 500dílků.

Tvar průběhu průtoku zobrazený na Graf 2.9 lze vysvětlit taktéž vlivem pozastaveného plnění. V prvotní části mohlo dojít k přicpání průtočné formy po kterém dochází k proudění voskové směsi velkou rychlostí. To zapříčiní roztavení části natuhlého vosku a tím zvýšení průtoku. Po uplynutí určitého času dochází k znovunatuhávání voskové směsi ve vtokové soustavě a tím snížení průtoku.

Z naměřených dat, která byla získána při různém nastavení vstřikolisu, byla stanovena průměrná hodnota průtoku tryskou v  $\text{cm}^3/\text{s}$ , kterou lze zadat průtok voskové směsi do simulačního softwaru (viz Tab. 2.8 a Graf 2.10).



Graf 2.10 Průměrné změny hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

Na Graf 2.10 jsou zobrazeny průběhy průtoku pro všechny skupiny nastavení. To znamená, že byly spočítány průměrné hodnoty průtoku pro jednotlivá nastavení, které byly vyneseny do grafu. Z grafu je zřejmé, že naměřené hodnoty lze rozdělit do 3 skupin podle podobnosti hodnot. Při porovnávání průběhů průtoků s Tab. 2.8 je patrné, že naměřený průtok není závislý na nastaveném parametru flow, ale je závislý na nastavení parametru pressure.

V manuálu vstřikolisu je uvedeno, že hodnotu průtoku ovlivňuje pouze parametr flow. Z výsledků měření průtoku voskové směsi plyne zjištění, že nastavení parametru flow významně neovlivňuje průtok voskové směsi, což odporuje tvrzení výrobce. Tvrzení, že průtok voskové směsi není významně ovlivněn nastaveným parametrem flow, odporuje také měření na testovací formě II (viz kapitola 2.2), ve kterém je na pořizovaných záznamech zjevné, že parametr flow ovlivňuje klíčově hodnotu průtoku voskové směsi.

Označení odstříku	Nastavený průtok "FLOW" (dítky)	Nastavený tlak "PRESSURE" (dítky)	Naměřený průtok (g/s)	Přepočtený průměrný průtok (cm <sup>3</sup> /s)
<b>IIA1</b>	150	100	9.7	8,85
<b>IIA5</b>	150	500	15.5	14,14
<b>IIB1</b>	300	100	6	5,47
<b>IIB5</b>	300	500	304.7	277,89
<b>IIC1</b>	450	100	5	4,56
<b>IIC5</b>	450	500	332.8	303,51
<b>IID25</b>	450	250	119	108,53
<b>IIE25</b>	300	250	120.3	109,71

Tab. 2.8 Průměrné průtoky vypočítané z naměřených dat pro jednotlivá nastavení experimentálního měření

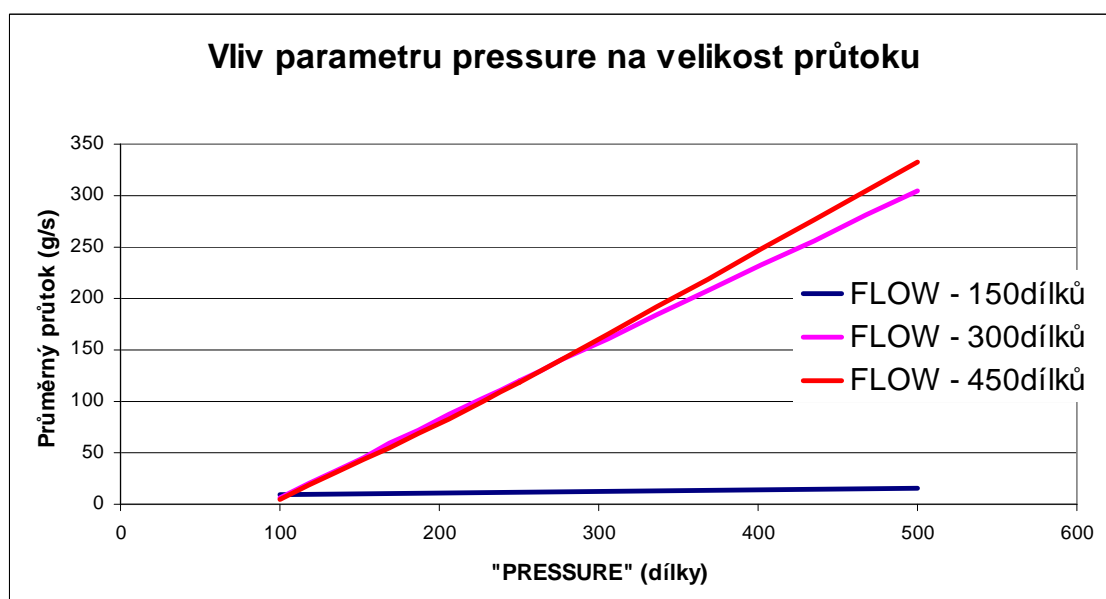
Pro získání představy, jakým způsobem je ovlivněn průtok voskové směsi nastavenými parametry, byl vytvořen Graf 2.11. Z tohoto grafu je zřejmé, že naměřený průtok voskové směsi je ovlivněn jak nastavením parametru flow tak i nastavením parametru pressure. Větší vliv na hodnotu průtoku voskové směsi má dle naměřených dat parametr pressure.

Parametr flow nejspíš ovlivňuje průtok voskové směsi ve skutečnosti jak má. To znamená, že hodnota průtoku je řízena pouze parametrem flow. To potvrzují i výsledky získané v kapitole 2.2. Avšak zvolené experimentální měření není vhodné pro získání přesných výsledků průtoku, jelikož naměřený průtok se řídí v experimentálním měření jinými principy.

Předpokládá se, že po začátku plnění dojde k ucpání průtočné formy tuhnoucí voskovou směsí, která se dostane do průtočné formy během přerušeno plnění. V případě nastavení nízkých hodnot parametru flow nebo hodnot parametru pressure dojde k naměření malých průtoků. V prvním

případě, protože malý průtok znamená natuhávající směs i ve zbytku vtokové soustavy formy. V případě malého tlaku pak není dostatečná síla pro protlačení voskové směsi vtokovou soustavou.

Dále hodnotu naměřeného průtoku ovlivní výrazně hodnota nastaveného parametru pressure. Při nastavení vyšší hodnoty parametru flow znamená vyšší hodnota parametru pressure větší množství proudící voskové směsi. To je způsobeno silou, která protlačí voskovou směs skrz plastický vosk ucpávající vtokovou soustavu. Maximální naměřená hodnota průtoku voskové směsi pak bude rovna nastavené hodnotě parametru flow. Po naměření maximálního průtoku pro dané nastavení parametru flow již zvyšující se hodnota parametru pressure nebude mít vliv na naměřenou hodnotu průtoku.



Graf 2.11 Vliv parametru FLOW na průměrný průtok voskové směsi tryskou vstříkolisu

### 2.3.3 Shrnutí

Z naměřených dat je zřejmé, že zvolený způsob měření průtoku není vhodný. Zjištění, že hodnotu průtoku ovlivňuje velkou měrou parametr pressure, odporuje nejen manuálu vstříkolisu ale i výsledku kapitoly 2.2. Kde z naměřených dat je zřejmé, že naopak průtok voskové směsi ovlivňuje největší měrou parametr flow.

Bylo by proto vhodné provést nové měření průtoku. Měření by bylo vhodné upravit o temperaturaci průtočné formy. To znamená, že teplota průtočné formy by měla dosahovat minimálně teploty voskové směsi. Vhodné by bylo také nahrazení pryžové hadice kovovou, která by byla zahřívána na stejnou teplotu jako průtočná forma.

Měření průtoku voskové směsi by šlo založit na snímání průběhu plnění formy shodně s kapitolou 2.2. Forma pro měření průtoku voskové směsi by však musela být objemově větší než testovací forma II. Dutina formy by měla dosahovat objemu 4litrů. Tato velikost by byla volena s ohledem na velikost vstřikovacího válce vstřikolisu. Pomocí snímání průběhu plnění a z toho vypočteného času plnění je snadné dopočítat hodnotu průměrného průtoku voskové směsi, která může být dostatečná pro tvorbu numerické simulace.

Funkčnost ventilu parametru flow nelze vyhodnotit ze získaných dat z důvodu nevhodnosti provedeného měření.

Získané hodnoty průtoku i jejich závislost na čase nebudou použity pro tvorbu numerické simulace. Použití těchto dat by znamenalo nepřesné nastavení podmínek simulace a tím znehodnocení výsledků celé simulace.

## **2.4 Numerická simulace Testovací formy II**

Z naměřených dat získaných během experimentálních měření je vytvořena numerická simulace v programu Cadmould 3D-F. Numerická simulace je vytvořena na základě naměřených dat za účelem následné validace výsledků této numerické simulace.

### **2.4.1 Nastavení numerické simulace**

Postup tvorby a zadání numerické simulace v simulačním softwaru Cadmould je podrobně popsán v kapitole 1.3.1.

Po načtení geometrie ve formátu .stl byla vygenerována výpočtová síť. Pro tuto generaci byla nastavena funkce Automatic Mesh Refinement (Zjemnění elementů výpočtové sítě na tenkých stěnách a hranách formy) a Relative 0,6 % (poměr vzdálenosti jednotlivých výpočtových elementů). Model

reprezentovaly maximální rozměry 250x200x37 mm a objem voskového modelu 367,4 cm<sup>3</sup>.

Pro tvorbu vtokové soustavy byl použit studený vtokový kůl o průměru 12mm a byl umístěn v pozici V3 (viz Obr. 1.10). Do materiálové databáze byl nahrán materiál Green WAX II, který byl vytvořen z naměřených dat k voskové směsi Remet Hyfill B478. Okrajové podmínky všech simulací byly zadány dle zkušeností z předchozí tvorby numerické simulace a jsou zobrazeny v tabulce :

<b>Teplota okolního prostředí</b>	20 °C
<b>Koeficient přestupu tepla prostředí</b>	8 W/m <sup>2</sup> K
<b>Koeficient přestupu tepla</b>	250 W/m <sup>2</sup> K
<b>Teplota vyhození modelu</b>	40 °C
<b>Max. tlak při zaplnění</b>	98%

Tab. 2.9 Okrajové podmínky simulace

Procesní parametry simulací byly zadávány dle naměřených dat viz tabulka :

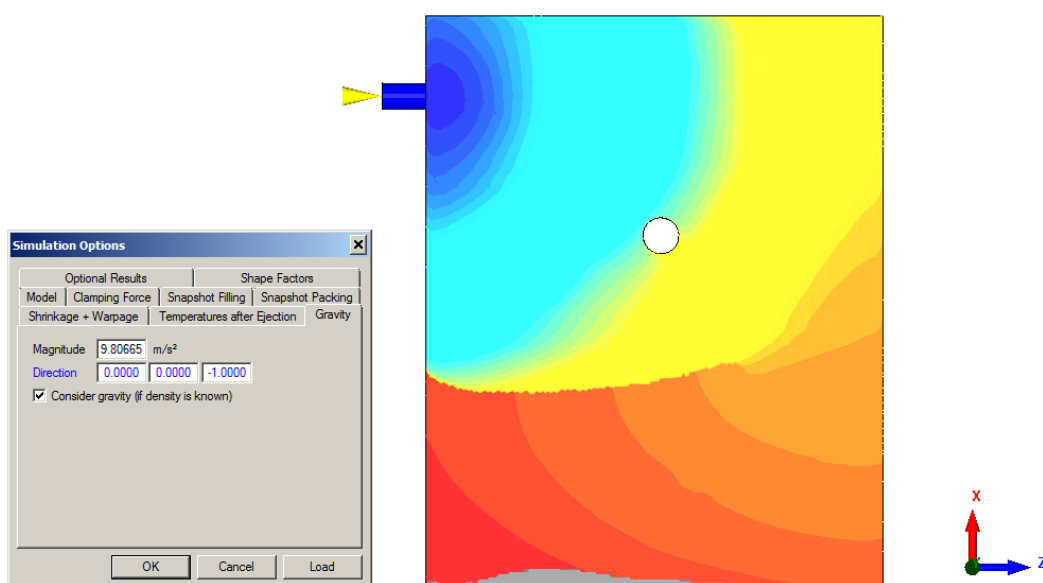
<b>Označení</b>	<b>Čas (s)</b>	<b>Tlak (bar)</b>	<b>Teplota formy (°C)</b>	<b>Teplota voskové směsi (°C)</b>
<b>2IIA30</b>	29.64	16.59	27.9	64
<b>2IIA80</b>	28.76	38.73	30.4	64
<b>2IIA15</b>	29.8	6.98	28.6	64
<b>2IIB32</b>	3.68	17.7	32.9	64
<b>2IIC30</b>	2.24	16.54	32.2	64
<b>2IIC15</b>	2.8	6.98	30.9	64
<b>2IID30</b>	1.72	16.03	33.4	64
<b>2IIE30</b>	1.28	16.23	33.5	64

Tab. 2.10 Nastavení procesních parametrů simulací získaných z experimentálního měření



Mezi zadávanými parametry není průtok voskové směsi v  $\text{cm}^3/\text{s}$  a to z důvodu zadání doby plnění. Po zadání doby plnění je průtok voskové směsi automaticky dopočítán z objemu modelu.

Další velmi důležité nastavení simulace, které ovlivňuje průběh plnění, je nastavení gravitace. Nastavuje se její hodnota a také orientace. Orientace musí být nastavena ve shodě s orientací testovací formy II. Orientace gravitace byla nastavena pro tvorbu numerických simulací ve shodě s Obr. 2.7.



Obr. 2.7 Nastavení gravitace a její orientace v numerické simulaci

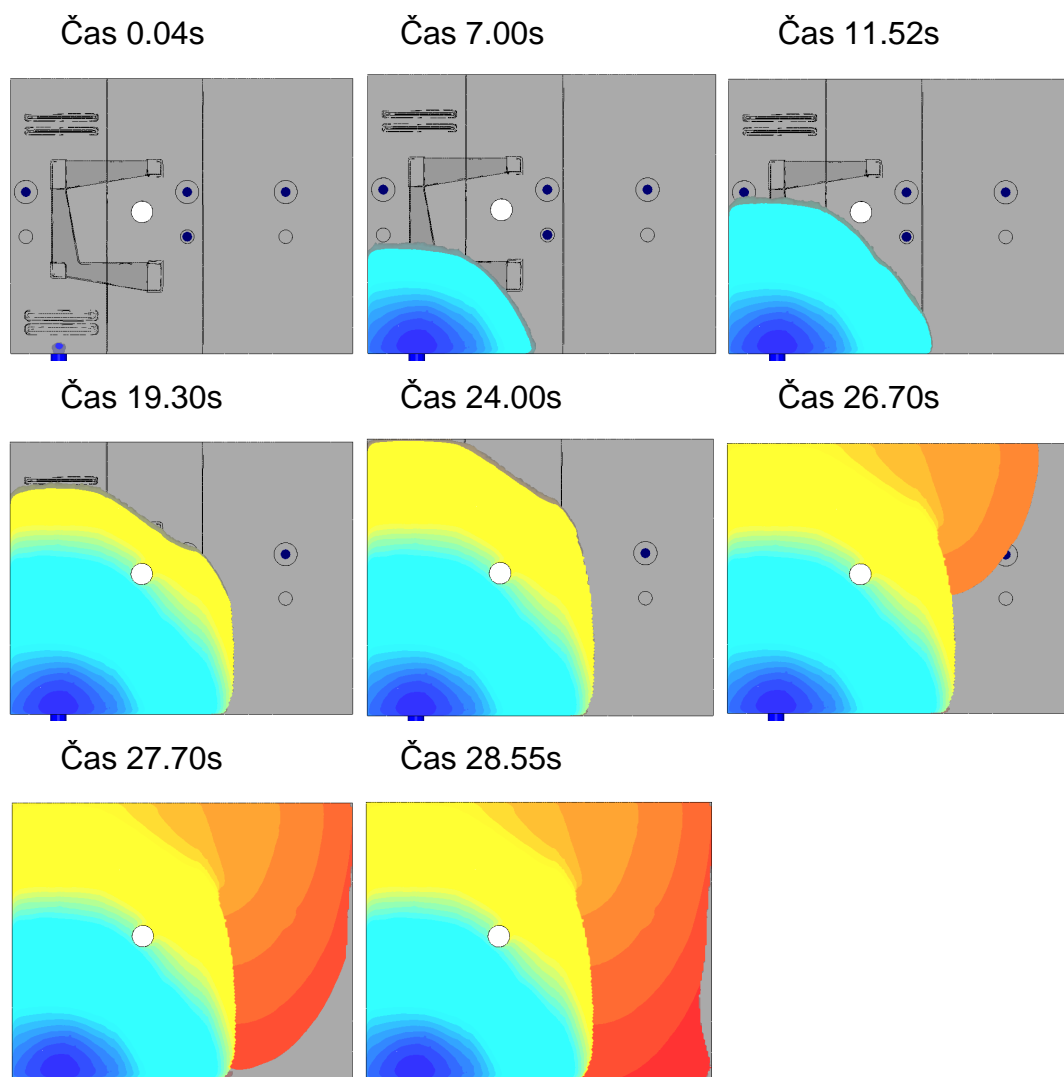
Simulace plnění dutiny testovací formy II trvala cca 2 hodiny a 3 hodiny v případě simulace plnění dutiny včetně deformace a smrštění na PC s hardwarovým a softwarovým vybavením Intel® Core™ i5, 3300 GHz, 8 GB RAM, 64 bitový operační systém Windows7 Professional.

#### 2.4.2 Výsledky průběhů plnění

Z výsledků numerické simulace byly zhotoveny snímky odpovídající tvarové podobnosti, dosaženého určitého místa nebo časovým okamžikům shodných s vyhodnocením průběhu plnění v kapitole 2.2.

Jako záchytné body při tvorbě těchto snímků byly využity hrany jednotlivých částí dutiny, umístění dutin a pozice senzorů. Tyto body byly voleny

s ohledem na to, že jejich pozice je snadno zřetelná jak v simulačním softwaru tak v pořízených snímcích v experimentálním měření.

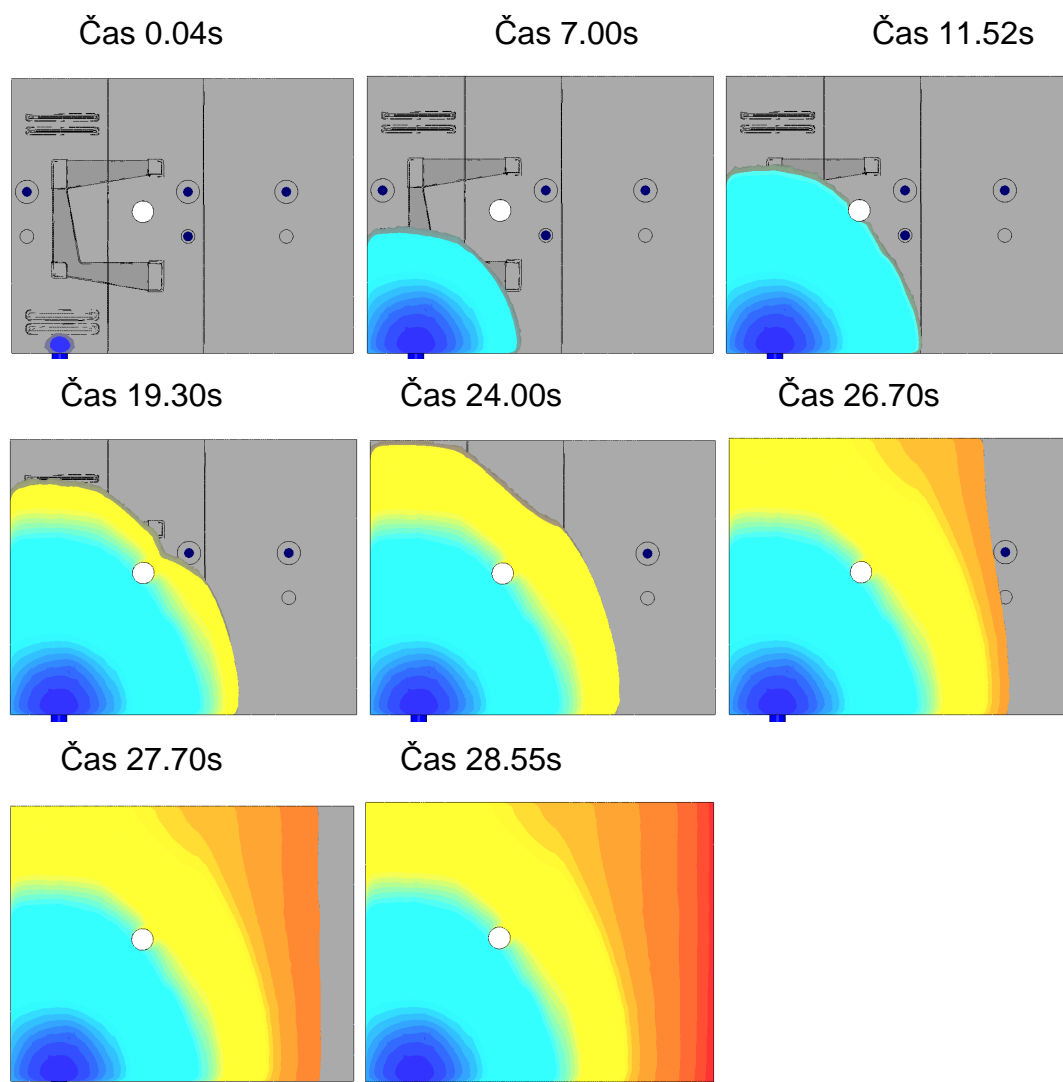


Obr. 2.8 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIA30

Do hlavní části práce byly vybrány ukázky získaných výsledků numerické simulace průběhu plnění dutiny formy. Snímky průběhu plnění pro zbylé nastavení simulací jsou přiloženy v příloze číslo 4.

Obr. 2.8 a Obr. 2.9 byly vybrány, aby reprezentovaly výsledky dvou skupin průběhů plnění. Tyto dvě skupiny byly vybrány i v kapitole 2.2.3.1. Jedná se o průběh plnění s nízkým průtokem voskové směsi, ve kterém vzniká studený

spoj a nezaběhnutí (viz Obr. 2.8). Druhý příklad průběhu plnění je pro nastavení vyššího průtoku kde nevzniká studený spoj ani nezaběhnutí (viz Obr. 2.9).



Obr. 2.9 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIB32

### 2.4.3 Validace numerické simulace testovací formy II

Pro použití numerické simulace, pro predikci průběhu plnění voskové směsi do dutiny formy, je potřeba nejprve ověřit přesnost jejich výsledků. Výsledky numerické simulace musí být porovnány s daty získaných z reálných odstříků.

### 2.4.3.1 Princip validace

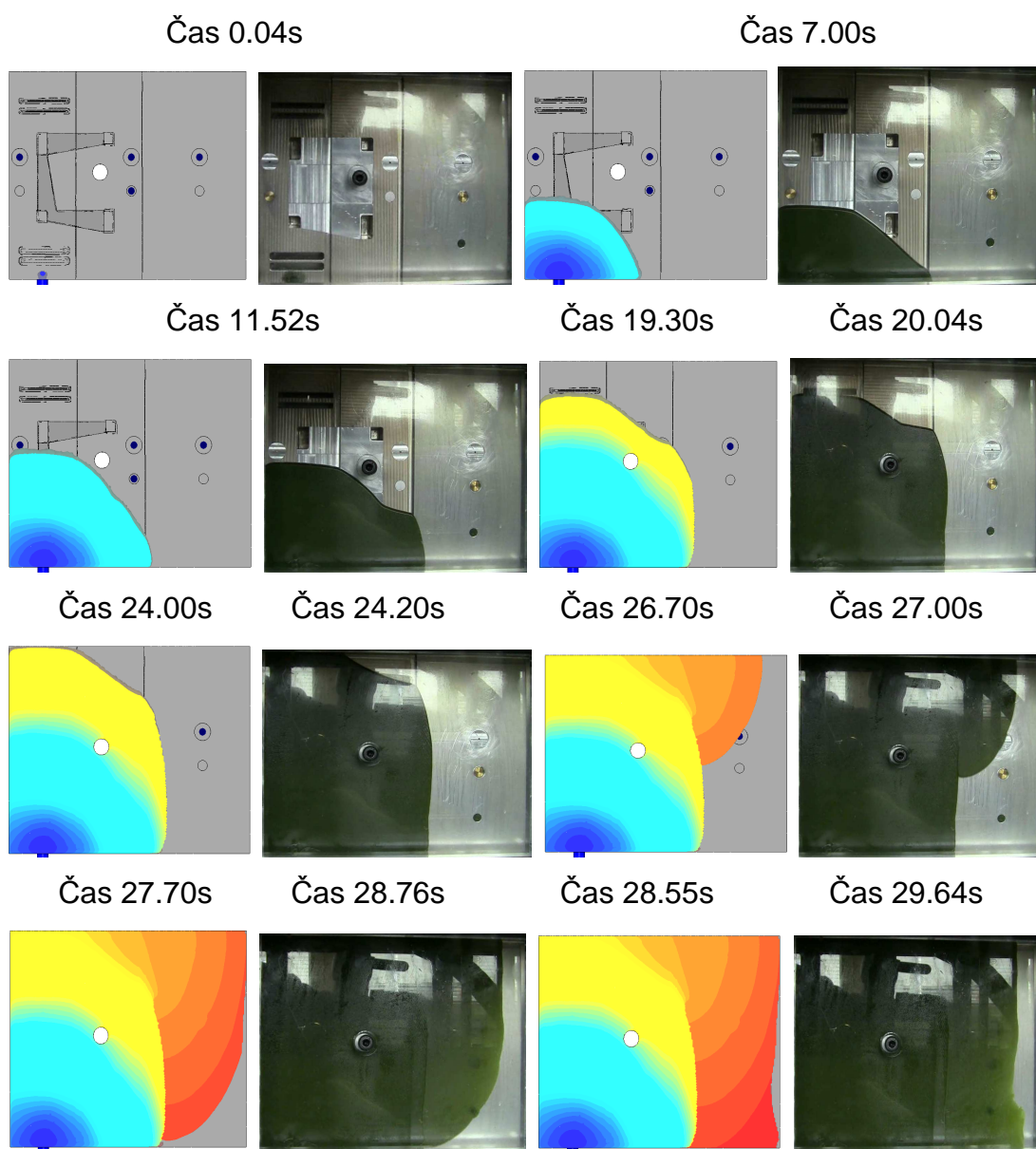
Validace výsledků numerické simulace probíhala pomocí porovnávání snímků získaných z natočených videozáznamů a snímků z průběhu plnění v simulačním softwaru. Z reálného plnění získaného z experimentálního měření byly vybrány takové časové okamžiky, aby reprezentovaly zaplnění vosku, které je možné porovnat bez větších nepřesností. Na těchto snímcích je dutina matečné formy zaplněna voskovou směsí a ta zaujímá určitý tvar, který je hledán na snímcích ve výsledcích numerické simulace.

Numerická simulace je lehce zkreslena. To zejména u simulací, kde dochází k plnění dutiny menším průtokem. To je dáno tím, že je zadán čas plnění testovací formy II. Avšak tato hodnota je lehce zkreslena o nezaběhnutou část formy. Pro tvar průběhu plnění numerické simulace to nemá významný vliv. Avšak tvarové podobnosti průběhu plnění jsou lehce časově posunuty.

### 2.4.3.2 Vyhodnocení výsledků simulace

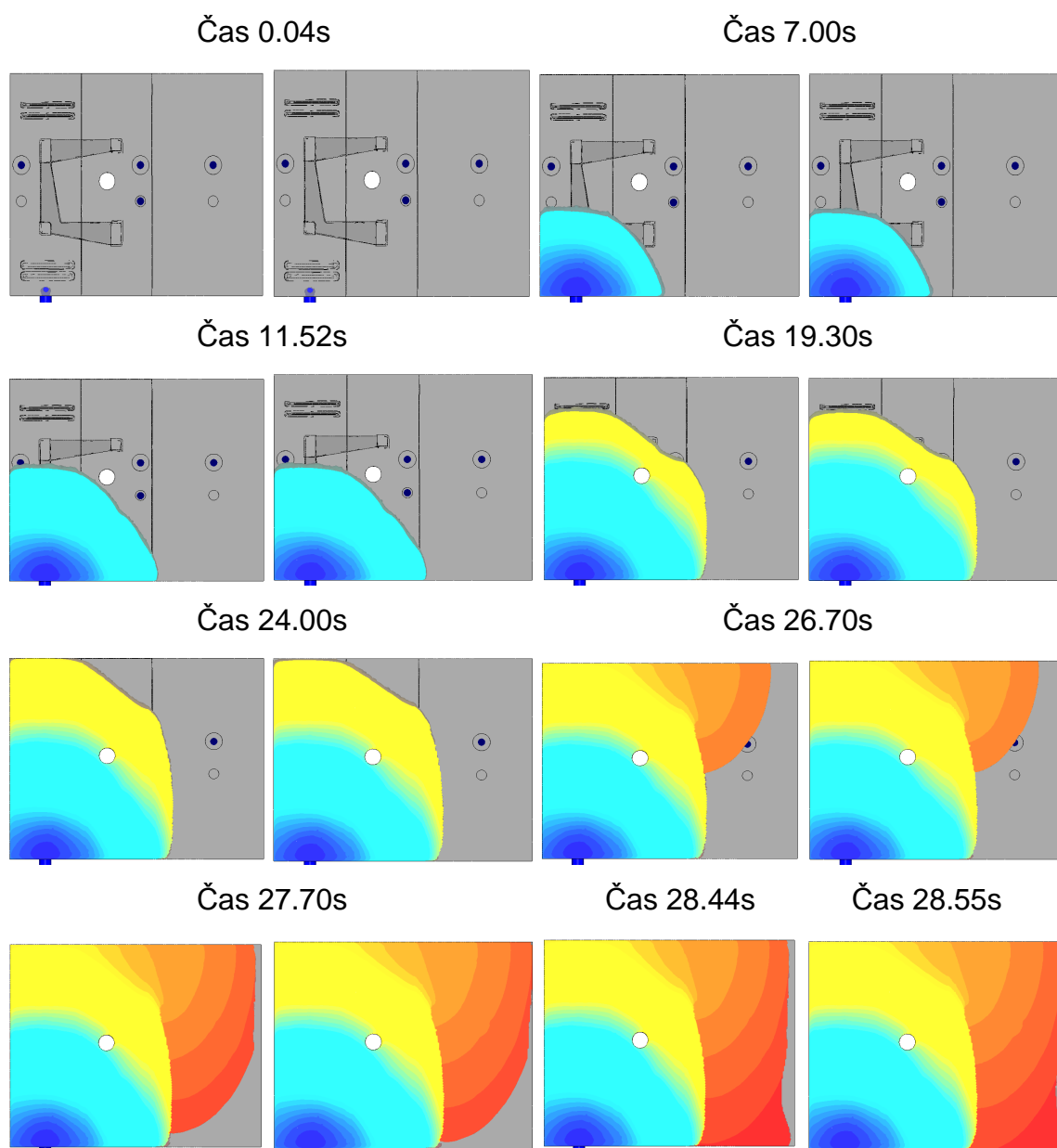
Do hlavní části diplomové práce byly vybrány dva příklady porovnání výsledků numerické simulace a snímků získaných z experimentálního měření. Zbylé nastavení probíhalo stejnými principy a bylo provedeno na základě porovnání přílohy č.2 a přílohy č.4.

Tvar průběhů plnění u nastavení 2IIA lze hodnotit jako velmi podobný viz Obr. 2.10. Ve všech simulacích byl predikován studený spoj ve shodě s experimentálním měřením. Jeho velikost a umístění se shodovalo. Lehká odchylka na studeném spoji lze pozorovat ve tvaru. Simulace předvídá vyboulení pouze na jednu stranu a na videozáznamu z měření je zřejmé dvojitě vyboulení. Simulace predikovala taktéž nezaběhnutí voskové směsi. Toto nezaběhnutí se tvarově shoduje s měřením, ale jeho velikost neodpovídá. Odchyly od tvaru (viz Obr. 2.10 v čase 11.52s) jsou způsobeny rychlejším plněním hlavní části modelu v numerické simulaci. V experimentálním měření docházelo k rychlejšímu plnění úzké dutiny formy označené jako hlavní část 4. v popisu testovací formy II.



Obr. 2.10 Validace průběhu plnění numerické simulace pro nastavení 2IIA30

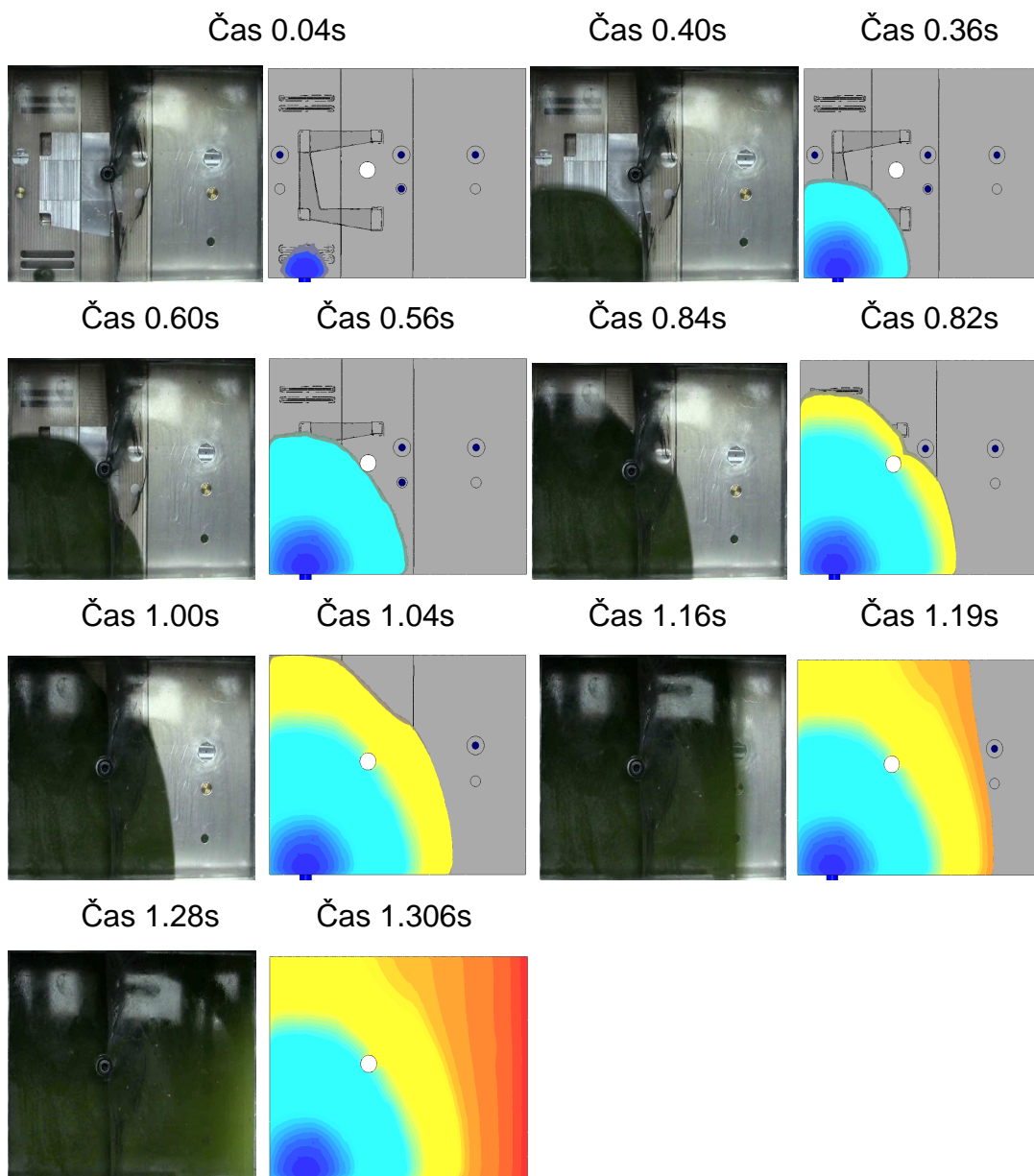
U simulací s nízkou hodnotou průtoku má velký vliv koeficient přestupu tepla. Tento vliv je znatelný na Obr. 2.11. Tento koeficient má významný vliv na zaběhnutí voskové směsi v tenkých stěnách voskového modelu. Jak je zřejmé z porovnání na Obr. 2.11 při nastavení vyšší hodnoty koeficientu tepelného přestupu vosková směs nezaběhne do nejužší části. Toto nezaběhnutí je svým tvarem a velikostí podobnější snímkům z experimentálního měření.



Obr. 2.11 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIA30 (Nastavení koeficientu přestupu tepla ve  $W/m^2K$ , pro levý sloupec 300 a pravý sloupec 250).

Tvar průběhu plnění simulací s nastavením 2IIB až E lze hodnotit jako shodný. Největší odchylka u simulací s vyšším průtokem je v úvodním snímku v čase 0.04s (viz Obr. 2.12) a to z důvodu pozastavení plnění u experimentálního měření. Tato odchylka z tohoto důvodu není brána jako chyba. K časovým odchylkám v těchto simulacích nedochází, jelikož u

experimentálního měření došlo k úplnému zaběhnutí voskové směsi. To má za následek přesnější zadání průtoku voskové směsi a tím přesnějších výsledků.



Obr. 2.12 Validace průběhu plnění numerické simulace pro nastavení 2IIE30.

#### 2.4.4 Shrnutí

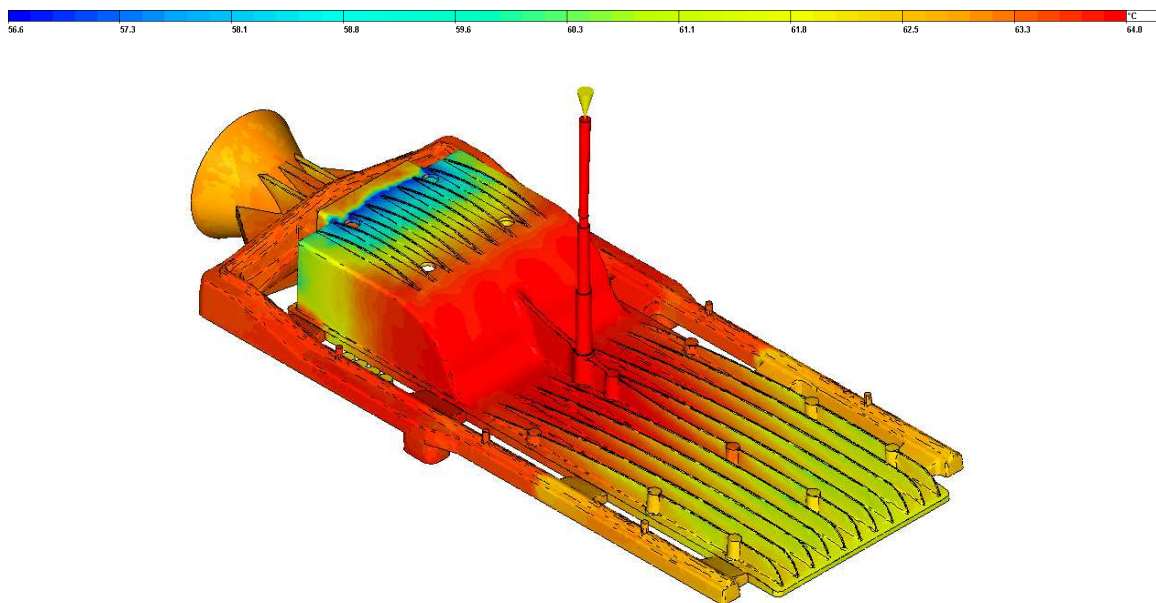
Z dat naměřených při experimentálních měřeních bylo provedeno zadání podmínek numerické simulace. Pro použití numerické simulace pro predikci průběhu plnění dutiny formy bylo potřeba provést porovnání výsledků numerické simulace se získanými snímky z experimentálního měření.



Z výsledků porovnávání vyplývá, že numerická simulace předvídá velmi úspěšně průběh voskové směsi. Drobné odchylky se objevují u simulací, které jsou počítány pro nižší hodnoty průtoku voskové směsi. Odchylky ve výsledcích simulace jsou pak především ve velikosti predikovaného nezaběhnutí voskové směsi do dutiny formy. Tuto velikost nezaběhnutí ovlivňuje koeficient přestupu tepla. Tento koeficient byl zadán jako přibližná hodnota doporučená dle manuálu simulačního softwaru. Pro zpřesnění numerické simulace je tedy potřeba provést měření koeficientu přestupu tepla.

## 2.5 Numerická simulace odlitku „19“

Odlitek „19“ byl vybrán pro simulaci z důvodu validace simulace programu CADMOULD 3D-F pro rozměrnější odlitky. Odlitek má objem  $3028\text{cm}^3$ . A je tak 8x větší než testovací forma II.



Obr. 2.13 Tvar geometrie „19“ - obrázek pořízený z numerické simulace 19-250. Rozsah teplotní osy nad obrázkem je  $56,6\text{ }^{\circ}\text{C} - 64\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.5.1 Postup tvorby simulace

Jako první krok tvorby simulace byla vytvořena výpočtová síť. Tato síť byla vytvořena ve spolupracující firmě dodávající software cadmould. A to z důvodu požadavků na kvalitu výpočtové sítě. Firma totiž disponuje softwarem, který



slouží k tvorbě a kontrole výpočtové sítě. Pro tvorbu vtokové soustavy byl použit studený vtokový kůl o průměru 8mm. Tento vtokový kůl byl vybrán v souladu s použitou vtokovou soustavou na formě modelu. Do materiálové databáze byl nahrán materiál Green WAX II, který byl vytvořen z naměřených dat k voskové směsi Remet Hyfill B478.

Data dodaná k odstříknutým vzorkům určených pro validaci byla :

- Nastavení parametru flow 120-200 dílků
- Nastavení parametru pressure 400 dílků
- Nastavená teplota vstřikované směsi 59°C

K tvorbě přesné numerické simulace chyběla informace o teplotě formy. Proto teplota formy byla volena s ohledem na zkušenosti s měřením teploty formy (viz kapitola 2.1). Další problém v nastavení simulace z dodaných dat je nastavení parametru flow. Kde nastavení 120-200 dílků by mělo odpovídat menšímu průtoku než  $100\text{cm}^3/\text{s}$ . Toto je zřejmé z naměřených dat v experimentálním měření (viz kapitola 2.2). Také rozmezí osmdesáti nastavených dílků parametru flow je velké a vnáší značnou nepřesnost. Proto pro výpočet průtoku voskové směsi byl použit vstřikovací čas. Ten byl získán z testovacích odstříků pozastavovaných po 2 sekundách. Z těch je zřejmé, že dutina formy je zcela zaplněna v čase 12sekund.

Nastavený tlak byl spočítán ze stanoveného vztahu v experimentálním měření (rovnice 2). Tlak odpovídal hodnotě přibližně 20,50 barů.

Teplota voskové směsi byla dle pracovníků slévárny nastavena na 59 °C. Simulační software neumožňuje zadat nižší hodnotu teploty než 64 °C. Toto omezení je způsobeno vybraným materiálem pro simulaci. V materiálové databázi se totiž nachází informace o nejnižší možné vstřikovací teplotě. Z experimentálního měření (viz kapitola 2.3) je zřejmé, že nastavená teplota voskové směsi je o 6 °C nižší než teplota naměřená při měření. Po přičtení tohoto rozdílu k nastavení teploty voskové směsi byla získána teplota pro nastavení numerické simulace (65 °C).

<b>Teplota okolního prostředí</b>	20 °C
<b>Koeficient přestupu tepla prostředí</b>	8 W/m <sup>2</sup> K
<b>Koeficient přestupu tepla</b>	250 W/m <sup>2</sup> K
<b>Teplota vyhození modelu</b>	40 °C
<b>Teplota voskové směsi</b>	65 °C
<b>Max. tlak při zaplnění</b>	98%

Tab. 2.11 Okrajové podmínky simulace

<b>Označení simulace</b>	<b>Doba plnění (s)</b>	<b>Tlak (bar)</b>	<b>Teplota formy (°C)</b>
<b>19-300</b>	12	20.5	30
<b>19-250</b>	12	20.5	30

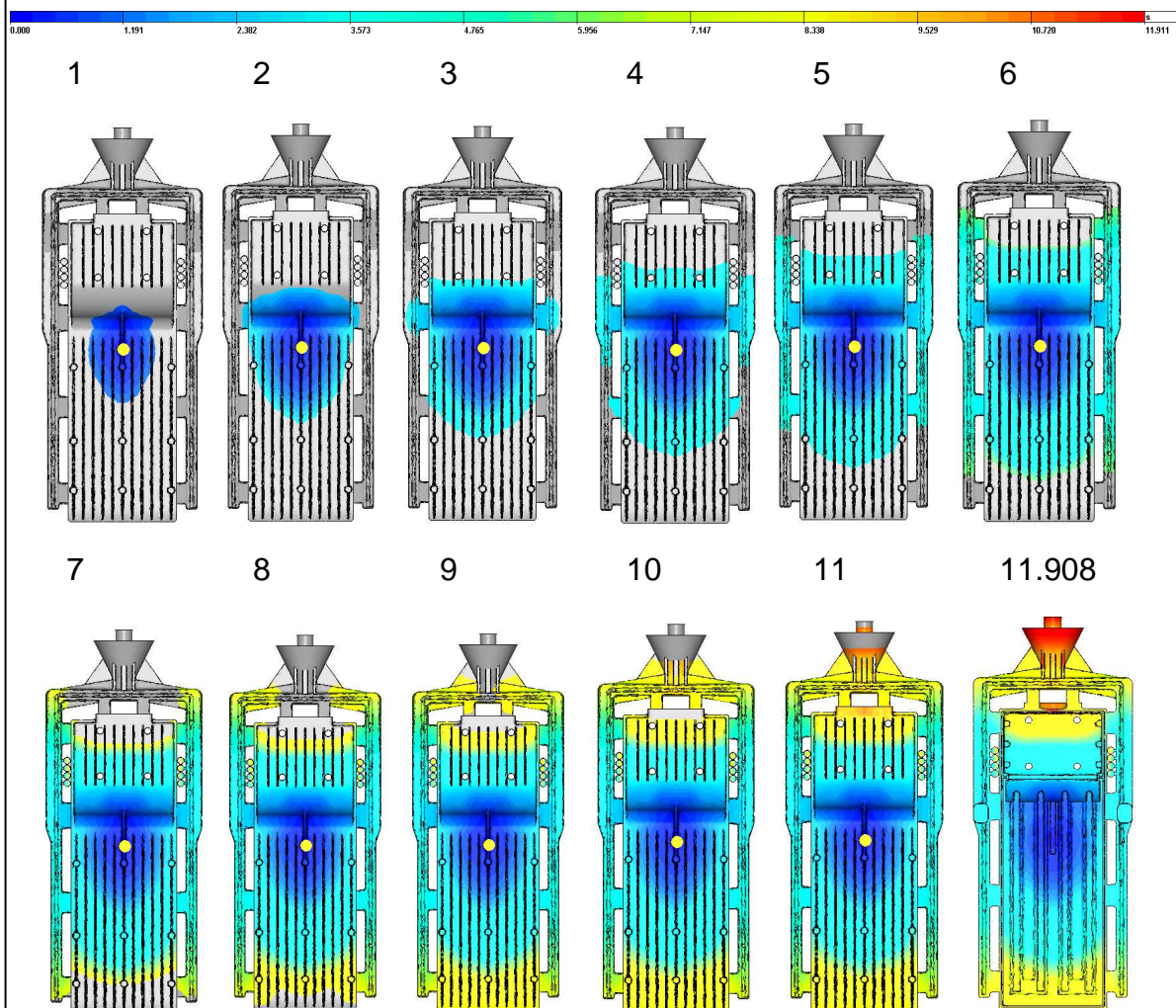
Tab. 2.12 Nastavení procesních dat simulace.

První číslo označení simulace udává název geometrie a druhé číslo udává nastavenou hodnotu koeficientu přestupu tepla. Rozdílné nastavení pro koeficient přestupu tepla bylo vybráno za účelem ukázky jeho velkého vlivu na výsledky numerické simulace.

Průběhy plnění dutiny formy z výsledků numerické simulace byly rozstříhány na jednotlivé snímky po jedné sekundě. Způsob tohoto zpracování byl vybrán pro získání co nejpřesnější představy o průběhu plnění získaného z numerické simulace. Takto zpracované výsledky numerické simulace jsou zobrazeny na Obr. 2.14 a Obr. 2.15.

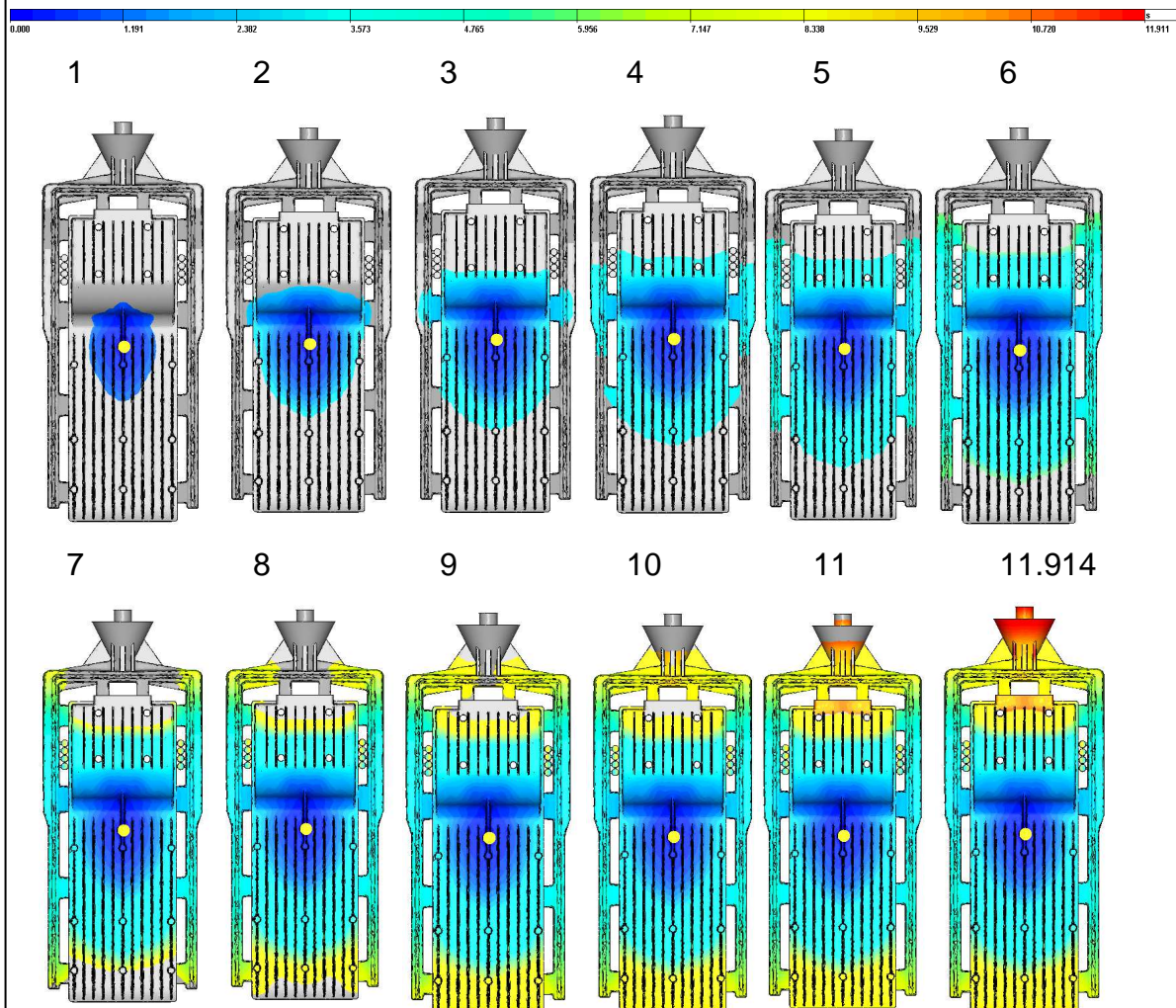
## 2.5.2 Výsledky simulací

Na snímcích z výsledků numerické simulace je patrné, že průběh plnění je rozdílný. Průběh plnění obou simulací lze považovat za shodný do časového okamžiku 10 sekund (viz Obr. 2.14 a Obr. 2.15). U simulace 19-250 pak dochází k zaplnění zbytku hlavní části modelu směrem od vtokového kůlu. U simulace 19-300 dochází k zaplnění této části voskem proudícím z vtokové soustavy. To znamená, že vosk je dodán do tohoto místa z vtokové soustavy nad modelem. Tento rozdíl dokládá velký vliv koeficientu přestupu tepla.



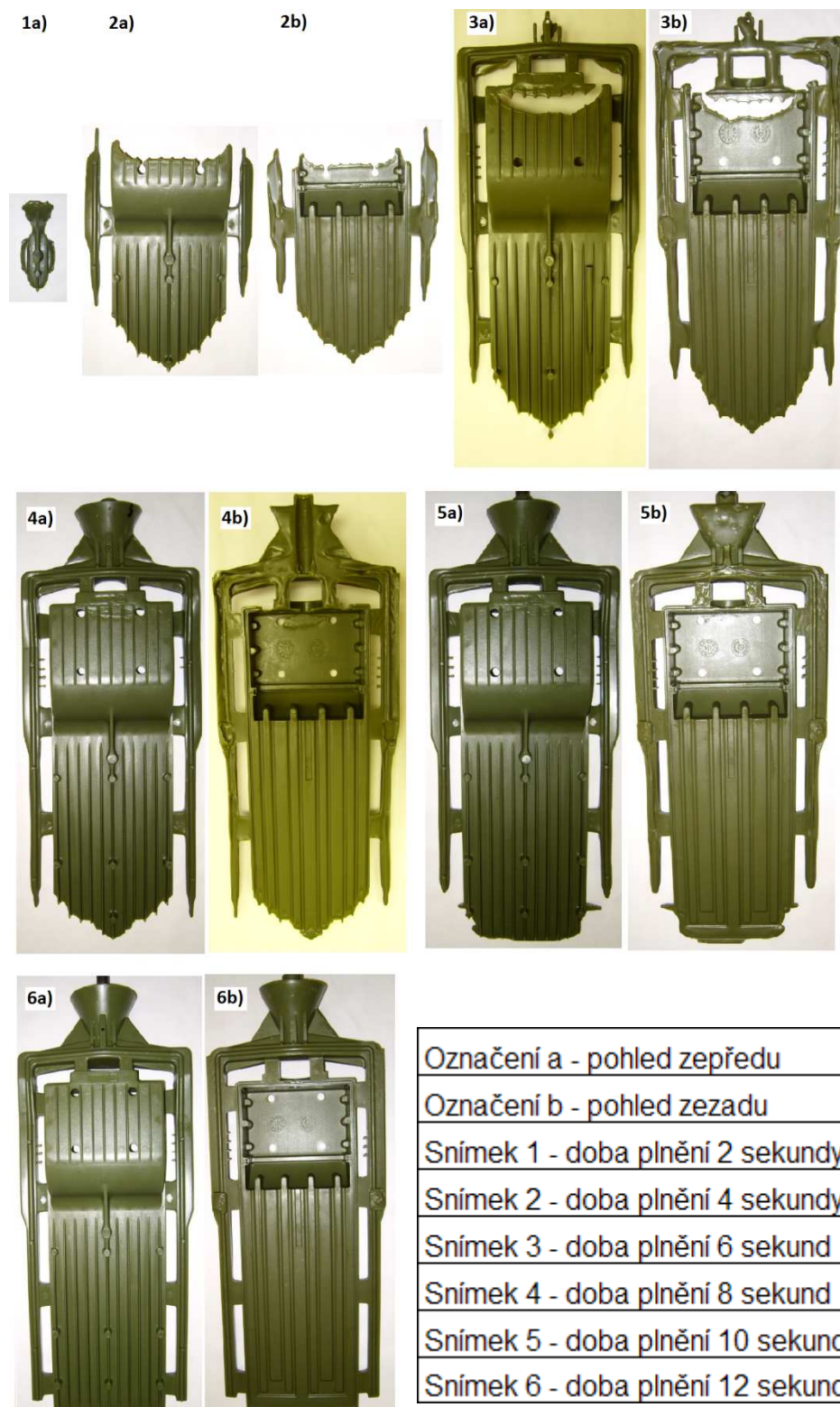
Obr. 2.14 Průběh plnění numerické simulace geometrie „19“ pro nastavení 19-250. Číslo nad obrázkem udává časový okamžik plnění v sekundách. Osa numerické simulace udává časový průběh plnění (0 - 11.908 sekundy).

Takto získané průběhy plnění dutiny formy byly použity k porovnání s obrázky získanými z experimentálního přerušení výroby tohoto voskového modelu. Obrázky průběhu plnění dutiny formy „19“ jsou zobrazeny na Obr. 2.16.



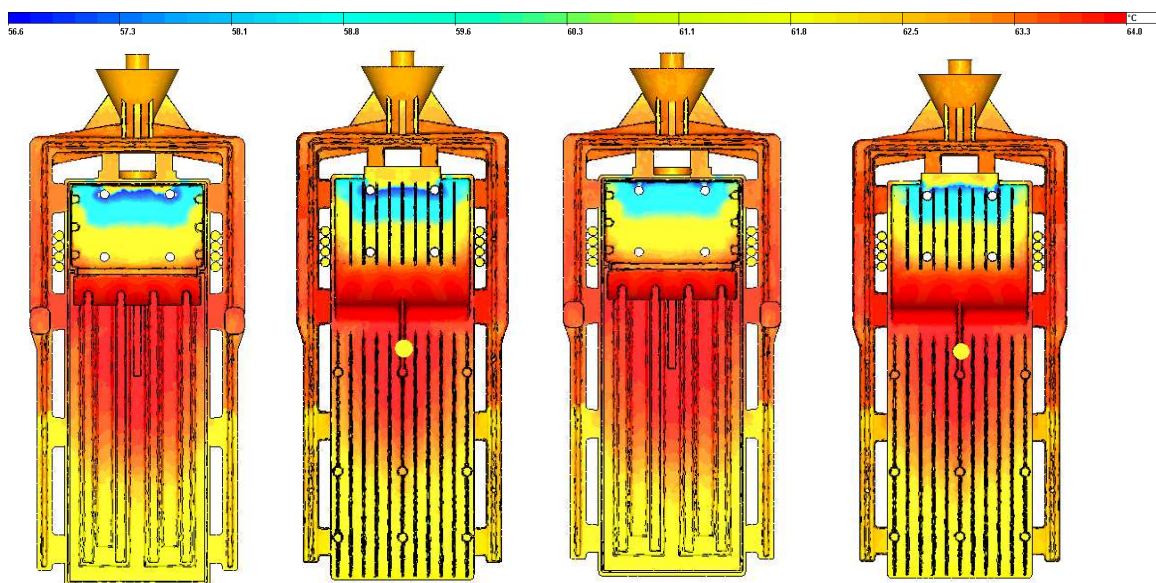
Obr. 2.15 Průběh plnění numerické simulace geometrie „19“ pro nastavení 19-300. Číslo nad obrázkem udává časový okamžik plnění v sekundách. Osa numerické simulace udává časový průběh plnění (0 - 11.914 sekundy).





Obr. 2.16 Průběh zaplňování dutiny „19“ získaný přerušením vstřikovacího cyklu

Pro ukázkou dalšího vlivu koeficientu přestupu tepla na výsledky numerické simulace je přiložen Obr. 2.17. Na tomto obrázku jsou zobrazeny teploty voskové směsi po ukončení plnění dutiny formy. Ze snímků je patrné, že změna koeficientu přestupu tepla má za následek posunutí pozice nejstudenějšího místa voskové směsi.



Obr. 2.17 Porovnání teplot voskového modelu. Vlevo numerická simulace 19-300. Vpravo numerická simulace 19-250. Rozsah teplotní osy nad obrázky je 56,6 °C – 65 °C. První a třetí obrázek náleží zobrazení zezadu a druhý a čtvrtý obrázek je pohled zepředu.

### 2.5.3 Validace numerické simulace

Ze zkušebních odstříků geometrie „19“ je zřejmé, že plnění neprobíhá od samého začátku vstřikovacího cyklu. Model odstříknutý v čase 2 sekundy tak odpovídá tvarově času přibližně 0.5 sekundy z vypočítaných simulací. Další nepřesností v získaných podkladech je fakt, že vyrobený model během přerušeného plnění neodpovídá přesně okamžiku přerušení. Vosková směs zůstává i po přerušení tekutá a nadále proudí formou. To z důvodu setrvačnosti pohybu voskové směsi a také díky působení gravitace. Odchytky vzniklé z těchto důvodů budou nalezeny především v místech, které jsou umístěny pod úrovní proudící voskové směsi.

S ohledem na tato fakta lze ohodnotit vypočítanou numerickou simulaci jako částečně shodnou. Vosková směs proudí od začátku plnění směrem od

vtoku ve všech směrech stejně rychle. V okamžiku, kdy dojde k plnění vtokové soustavy, přechází hlavní proud voskové směsi do vtokové soustavy. Nadále probíhá zaplňování hlavní geometrie modelu avšak už nižší rychlostí. Po zaplnění většiny vtokové soustavy dochází k zaplnění zbylého místa hlavní geometrie.

Z numerické simulace se dá predikovat možný vznik studeného spoje, vznik bublin nebo nezaběhnutí voskové směsi. Toto je zřejmé z Obr. 2.13, na kterém je modře označena nejstudenější vosková směs. V tomto místě může docházet ke vzniku vad. Umístění místa kde dochází ke spoji dvou front voskové směsi ze získaných zkušebních odstříků je ve shodě s predikcí simulace 19-300.

#### **2.5.4 Shrnutí**

Numerická simulace geometrie „19“ byla provedena za účelem ověření výsledků numerické simulace v programu Cadmould pro tvarově a rozměrově náročnější voskové modely.

Ze získaných výsledků lze hodnotit průběh plnění v numerické simulaci jako podobný. Odlišnosti v predikci průběhu plnění mohou být způsobeny zvoleným způsobem zisku vzorků určených pro porovnání. Také hodnoty dodané k těmto vzorkům nebyly kompletní a přesné. Pro úspěšné nasazení programu pro predikci průběhu plnění dutiny v provozu slévárny je potřeba provést další měření pro zpřesnění výsledků. Také je nutné provést nové zkušební odstříky pro složitější model. U těchto nových odstříků je potřeba provést měření teploty voskové směsi a formy. Je nutné také zaručit, aby zkušební odstřík byl pořízen přesně ve stanovený čas.

Dalším účelem tvorby simulací bylo ukázat vliv koeficientu přestupu tepla na průběh plnění voskové směsi a následné tuhnutí této směsi. Vliv koeficientu přestupu tepla je zřejmý na Obr. 2.17. Z důvodu nastavení tohoto koeficientu na hodnotu doporučovanou od výrobce programu dochází k nepřesnostem simulace. Z tohoto důvodu je potřeba provést měření koeficientu přestupu tepla mezi voskovou směsí a materiálem formy.

### 3 ZÁVĚR

Technologie přesného lití je vyhledávaná zákazníky, kteří požadují převážně tvarově náročné a vysoce kvalitní odlitky. Pro zrychlení a zlevnění výroby jsou dnes využívány numerické simulace. V dnešní době existuje několik simulačních softwarů určených pro průběh plnění a predikci vad odlitků. Pro výrobu matečného modelu však takovýto software neexistuje. Proto je vidina vzniku tohoto modulu numerické simulace velmi perspektivní.

K tvorbě numerické simulace průběhu plnění dutiny modelu voskovou směsí bylo potřeba vytvořit materiál v databázi softwaru. Naměření všech potřebných dat pro tvorbu nového materiálu v simulačním softwaru bylo provedeno pomocí externí chemické laboratoře, kde se zabývají měřením materiálových dat.

Pro zadání procesních dat simulace bylo potřeba provést měření průtoku, tlaku a teploty formy. Za tímto účelem byly provedeny dvě experimentální měření. Data získané z experimentálního měření průtoku pomocí průtočné formy byla velmi zkreslená. Jejich nepřesnost byla způsobena ochlazováním voskové směsi v průtočné formě. Tímto jevem docházelo k ucpání vtokové soustavy. Pro zpřesnění naměřených dat by bylo potřeba provést opakované měření s temperovanou formou.

Měření tlaku ukázalo, že vstřikolis pracuje stabilně a hodnota tlaku není závislá na nastavení průtoku voskové směsi. Z naměřených dat byla stanovena závislost mezi nastaveným parametrem pressure v dílcích a reálnou hodnotou tlaku v barech. Také bylo zjištěno, že nastavená hodnota tlaku je ve skutečnosti vždy nižší než reálná velikost tlaku. Tato zjištění platí pro daný vstřikolis.

Pro validaci numerické simulace bylo potřeba získat záznam průběhu plnění dutiny formy, který byl pořízen při experimentálním měření na videokameru. Získané záznamy byly pro lepší zpracování rozstříhány na jednotlivé snímky.

Výpočet numerické simulace byl proveden na základě nastavení parametrů získaných z experimentálních měření. Průtok voskové směsi byl zadán časem plnění formy, který byl získán ze záznamu průběhu plnění.



Nastavení tlaku bylo provedeno podle naměřených tlaků pro jednotlivé odstřiky. Pro teplotu formy byla použita teplota získaná na počátku měření plnění testovací formy.

Výsledky numerické simulace testovací geometrie II byly vyhodnoceny jako dostatečně přesné pro použití predikce průběhu plnění. Toto využití je omezeno na modely stejné tvarové náročnosti a jejich stejně velkém objemu. Pro predikci rozměrově rozsáhlejších modelů je potřeba provést další měření pro zpřesnění výsledků. Avšak i se současným stavem tvorby simulace je možné úspěšně predikovat některé možné problémy při výrobě voskového modelu. Jako příklad predikce těchto vad lze uvést tvorba studených spojů a nezaběhnutí.

Další postup zpřesnění výsledků numerické simulace by se měl ubírat experimentálním měření koeficientu přestupu tepla mezi voskovou směsí a materiálem formy. Také je nutno konzultovat s dodavatelem simulačního softwaru cadmould jakým způsobem simulační software pracuje s koeficientem přestupu tepla a co vše z nastavení numerické simulace jej ovlivňuje.

Jak je z diplomové práce patrné, použití současných softwarů pro tvorbu numerické simulace průběhu plnění voskového modelu je reálné. Avšak pro přesnost predikce průběhu plnění je potřeba provést měření na používaném vstřikolisu a použitém materiálu formy. Pro každý použitý vstřikolis je potřeba provést nové měření. Stejný postup se uplatní při změně materiálu formy.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Brno, 2003. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.

[2] ŠMÍD, Dušan. *Optimalizace technologie vybraných náročných odlitků ze slitin Al*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s.79.

[3] BEELEY, PR. and SMART, RF. *Investment Casting*. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.

[4] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Straight (Unfilled) Wax*. 2006 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z:

[http://www.blayson.com/downloads/straight\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/straight_wax.pdf)

[5] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Emulsified Wax*. 2011 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z:

[http://www.blayson.com/downloads/emulsified\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/emulsified_wax.pdf)

[6] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Filled Wax*. 2011 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z:

[http://www.blayson.com/downloads/filled\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/filled_wax.pdf)

[7] WILLIAMS, R.B. *Update on Investment Casting Wax*. *Investment Casting Wax* [online]. 1991 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z:

<http://investmentcastingwax.com/downloads/tl10.pdf>

[8] WILLIAMS, R.B. *Waxes for Investment Casting – A view from England*. InvestmentCasting Wax [online]. 1987 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl1.pdf>

[9] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Water Soluble Wax* [online]. 2011 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/soluble\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/soluble_wax.pdf)

[10] BLAYSON OLEFINES LTD. *Wax Product Range and Services* [online]. 2011 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/product\\_range.pdf](http://www.blayson.com/downloads/product_range.pdf)

[11] HIRST, RICHARD. *Cost Reduction Through Wax Reclamation: EICF Best Practice Workshop Bilbao*. Investment Casting Wax [online]. 2005 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl3.pdf>

[12] BLAYSON OLEFINES LTD. *Product Information – Recycled Wax* [online]. 2011 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/recycled\\_wax.pdf](http://www.blayson.com/downloads/recycled_wax.pdf)

[13] BOND, David a Koji NISHIKAWA. *Investment Casting Technology*. Investment Casting Wax [online]. [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>

[14] IGI Microcrystalline Waxes. *Microcrystalline Wax* [online]. [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: <http://igiwax.com/index.php?page=microcrystalline-wax/>

[15] BOND, David. *Fillers in Wax: Developments of Stable Filled Wax. Investment Casting Wax* [online]. 2009 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl18.pdf>

[16] FIELDER, Harvey. DUSSEK CAMPBELL YATES LTD. *The Effect of Fillers on the Physical Properties of Investment Casting Waxes*. Crayford, Kent, (Velká Británie). [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: <http://www.remetuk.com/technical-paper/tp-45-the-effect-of-fillers-on-the-physical-properties-of-investment-casting-waxes.htm>

[17] NĚMEC et al. *FEM Principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: PROTISK Slavkov, 1997, 401 s. ISBN 80-7226-021-9.

[18] SIMCON KUNSTSTOFFTECHNISCHE SOFTWARE GMBH. *Cadmould 3D-F Fill: User Manual Version 6.0*. Wurselen, 2012, 213 s.

[19] KOSOUR, V. *Využití numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 139 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

[20] SHELL-O-MATIC INC. *Technická dokumentace k vstřikolisu 60T-20/28*. Quebec, 1995.

[21] SHELL-O-MATIC INC. *Technická dokumentace k vstřikolisu 35T-20/28*. Quebec, 1995.

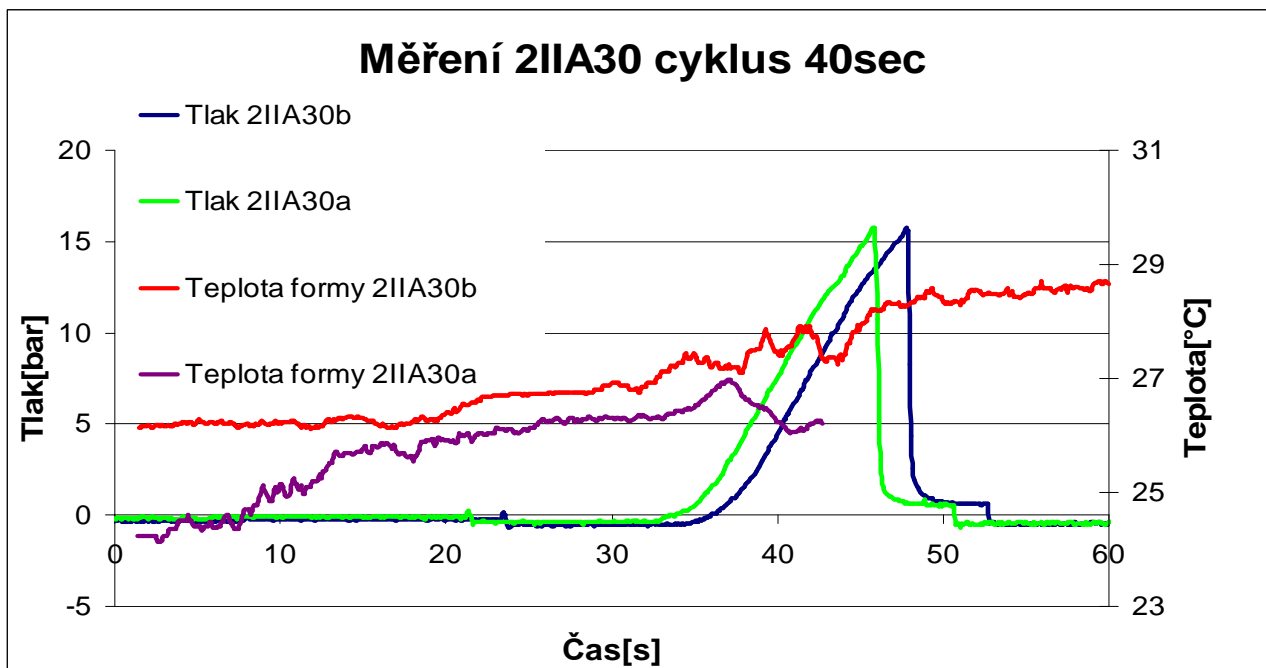
**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

<b>Zkratka/Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
p	bar	Nastavený vstřikovací tlak
D	dílky	Nastavení parametru pressure
pn	bar	Naměřený tlak
x	volt	Naměřená hodnota z tlakového čidla
po	bar	Odhadovaný nastavený tlak vstřikolisu
Qv	cm <sup>3</sup> /s	Objemový průtok
V	cm <sup>3</sup>	Objem dutiny formy
T	s	Čas plnění dutiny formy

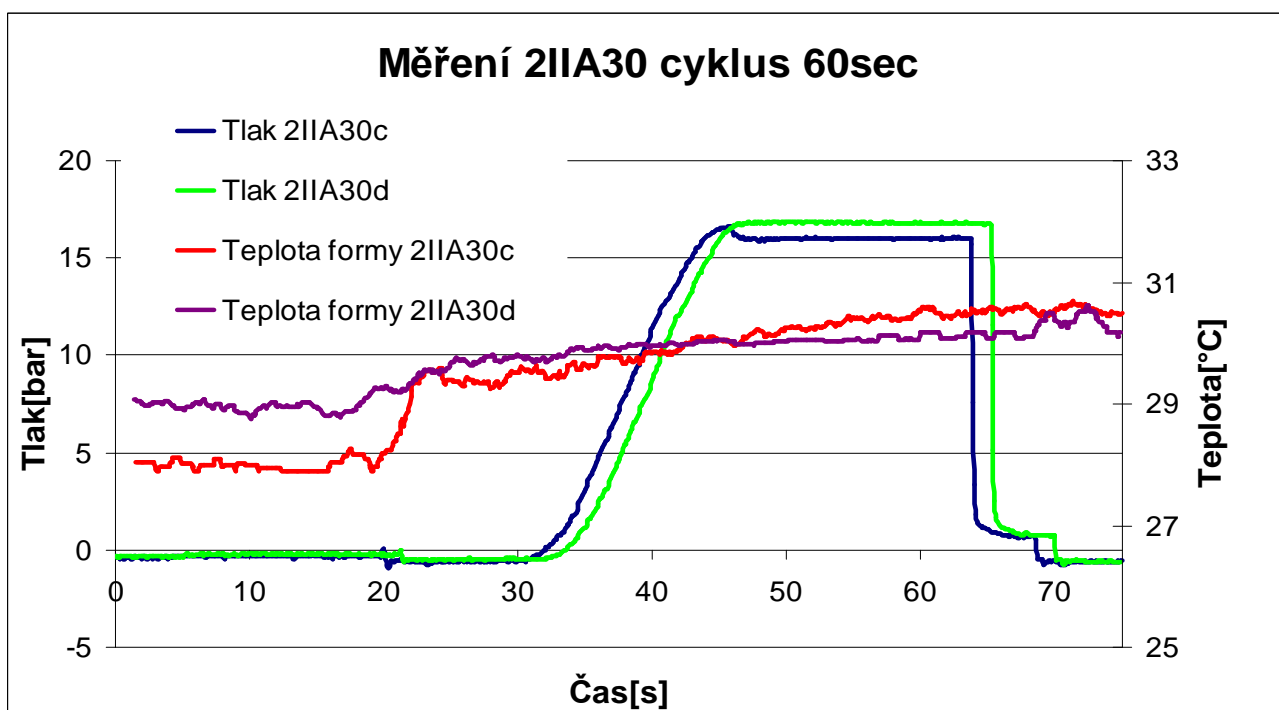
**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Měření tlaku a teploty na testovací formě II.
- Příloha 2 Měření průběhu plnění na testovací formě II.
- Příloha 3 Měření průtoku voskové směsi
- Příloha 4 Numerické simulace testovací formy II

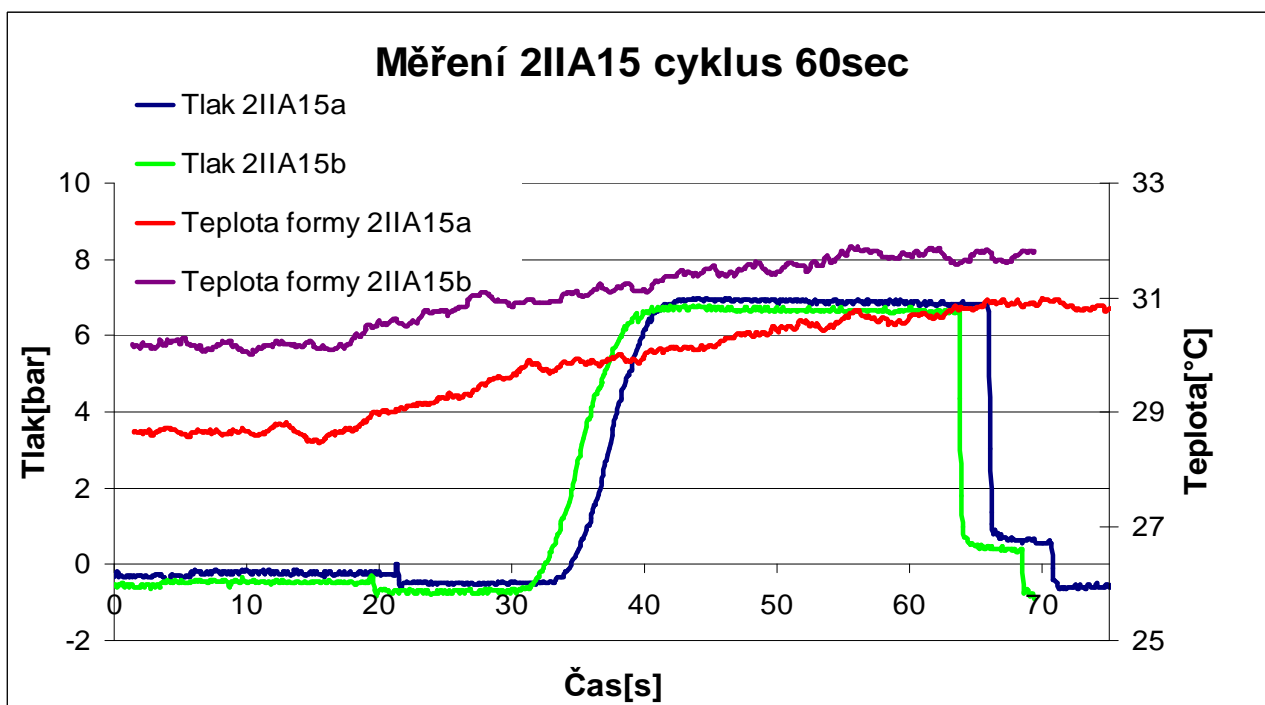
## Příloha 1



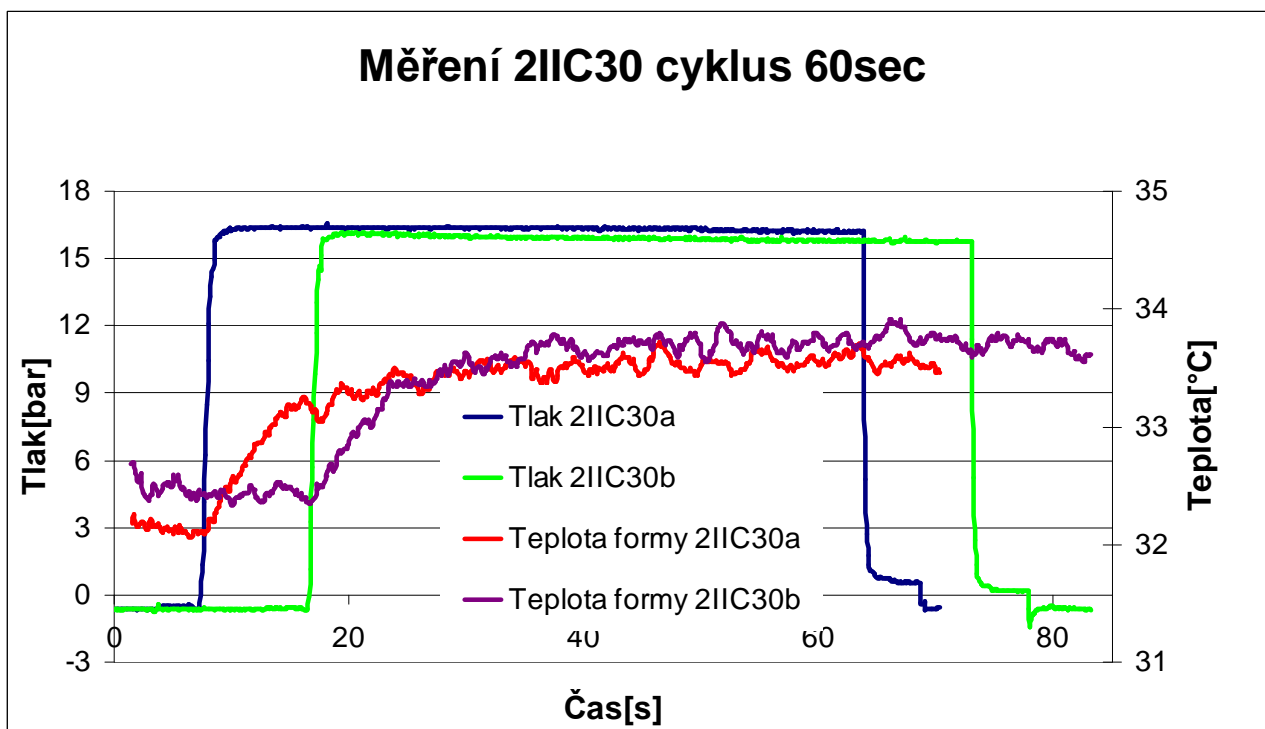
Graf P1.1 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIA30. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 300dílků.



Graf P1.2 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIA30. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 300dílků.

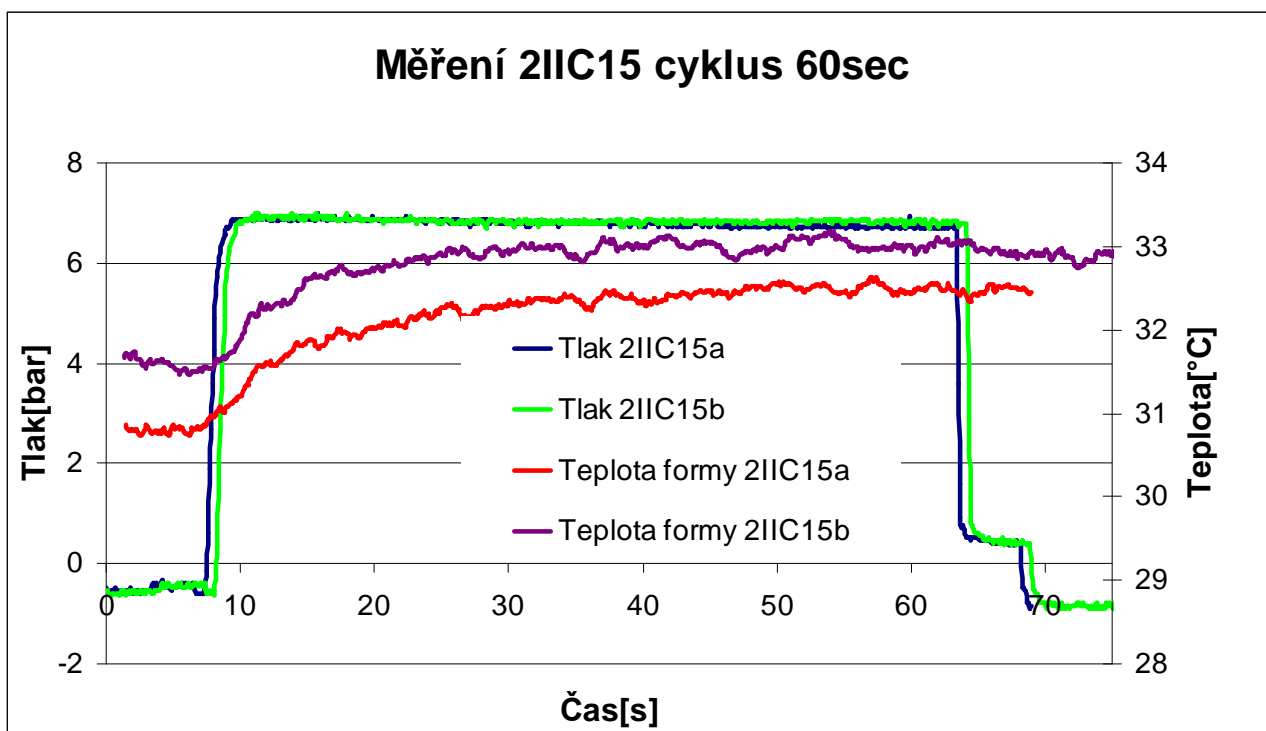


Graf P1.3 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIA15. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 150dílků.

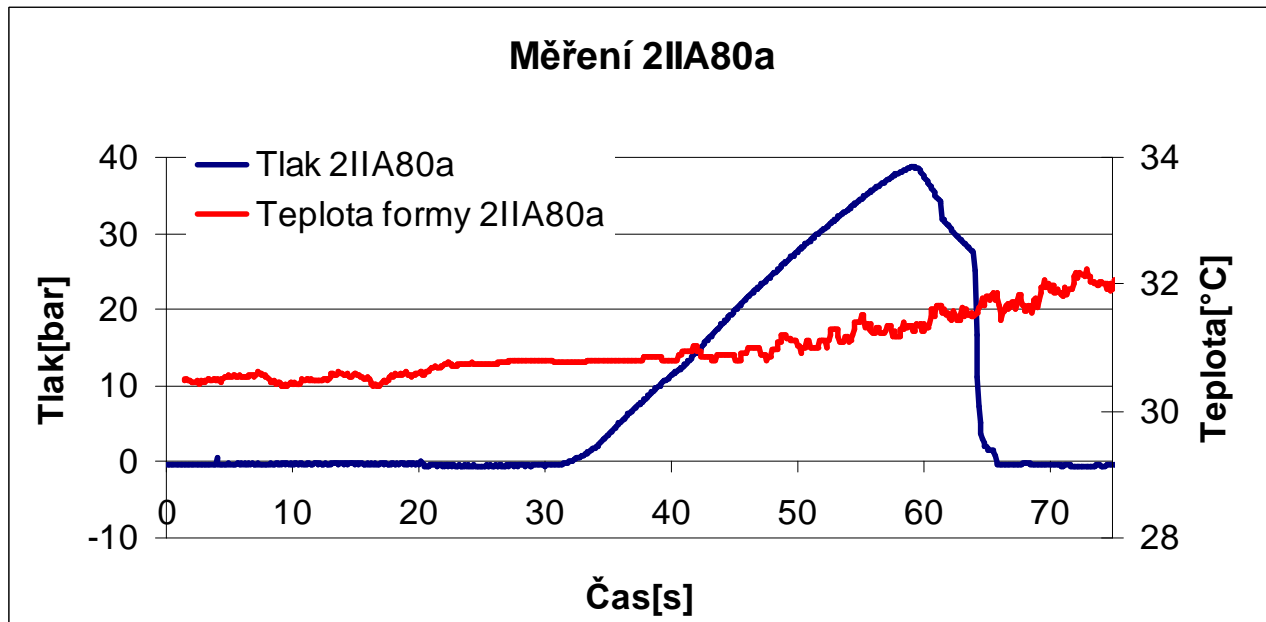


Graf P1.4 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIA15. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 300dílků a Pressure 300dílků.

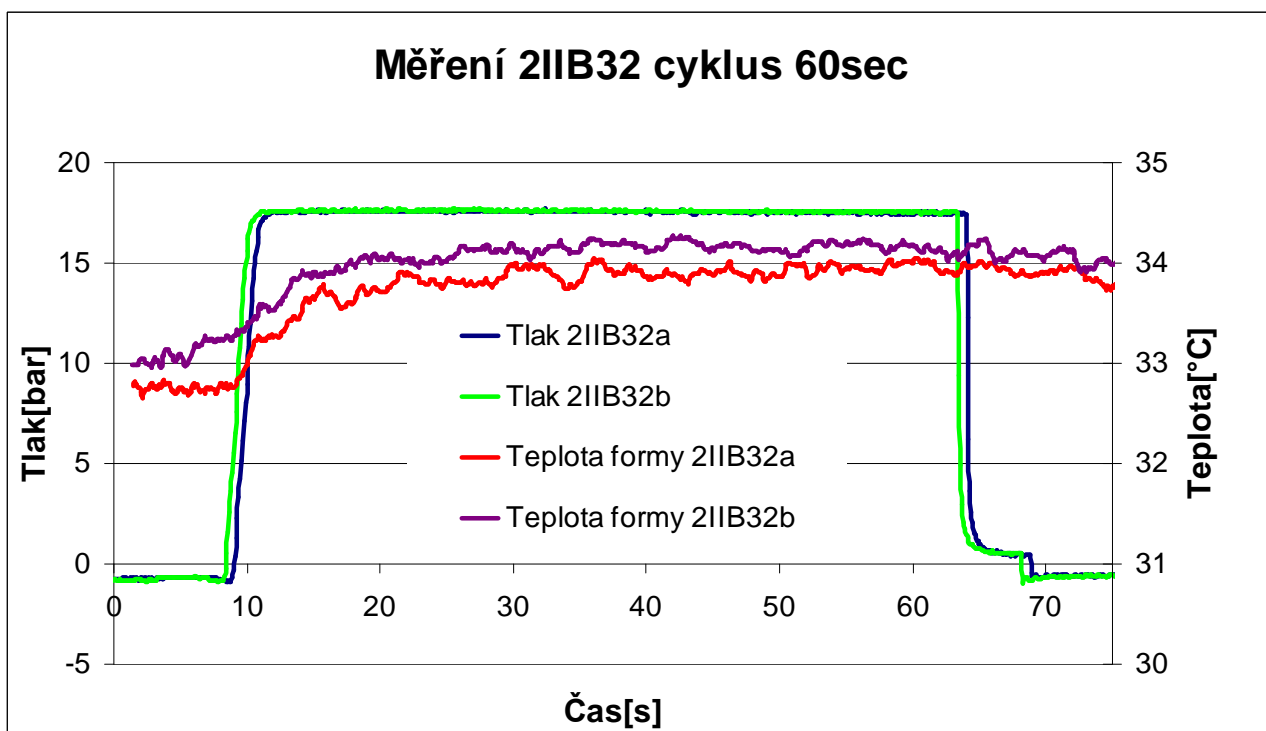




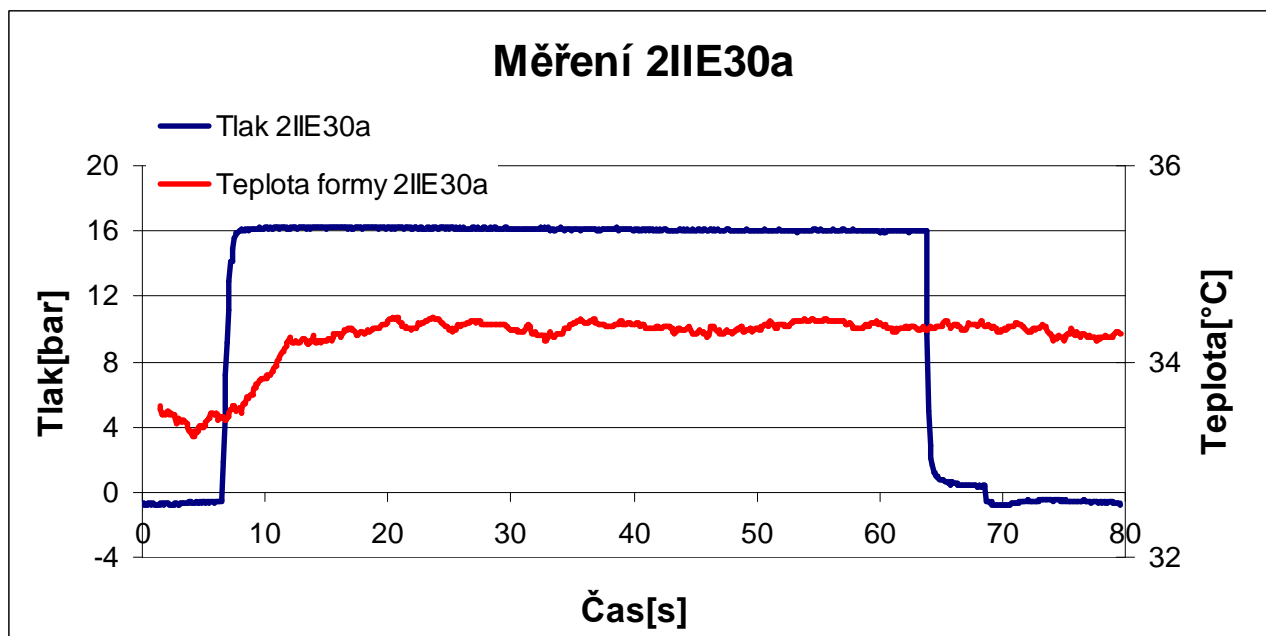
Graf P1.5 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIC15. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 300dílků a Pressure 150dílků.



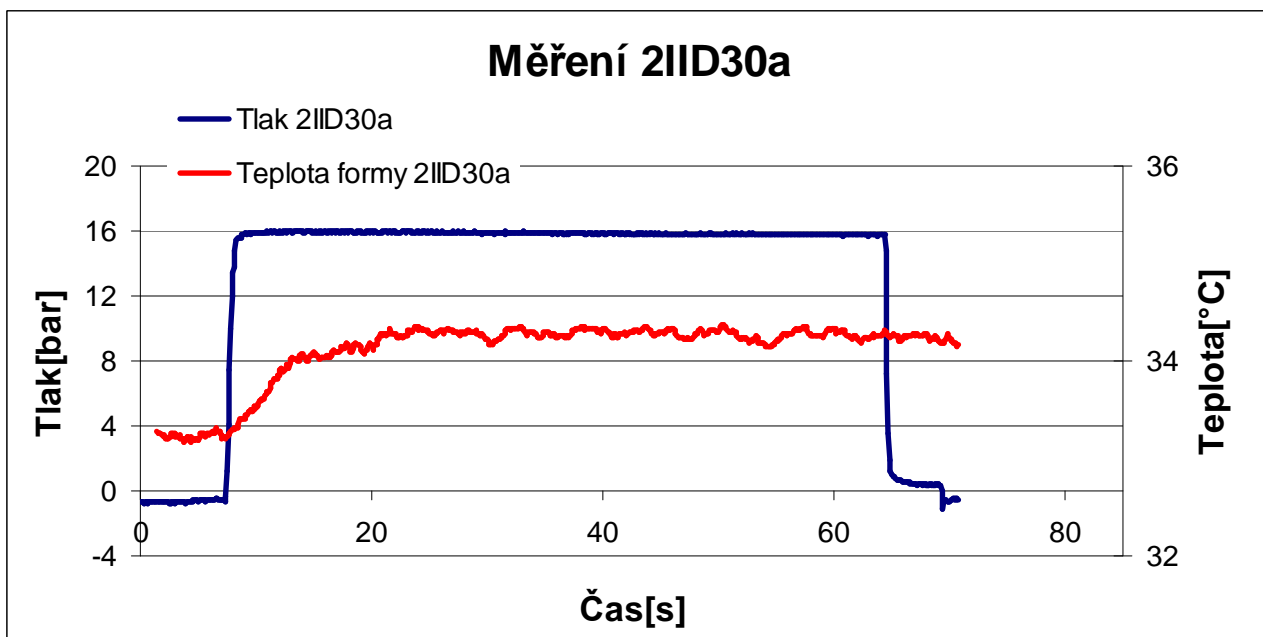
Graf P1.6 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIA80a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 800dílků.



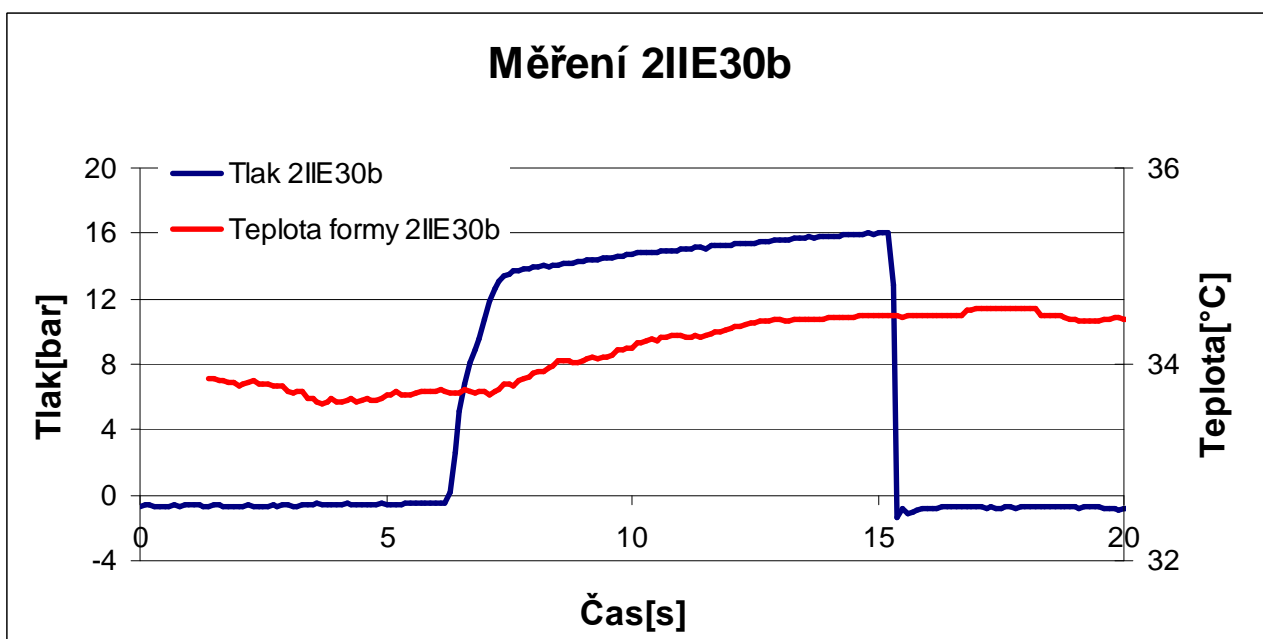
Graf P1.7 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIB32. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 250dílků a Pressure 320dílků.



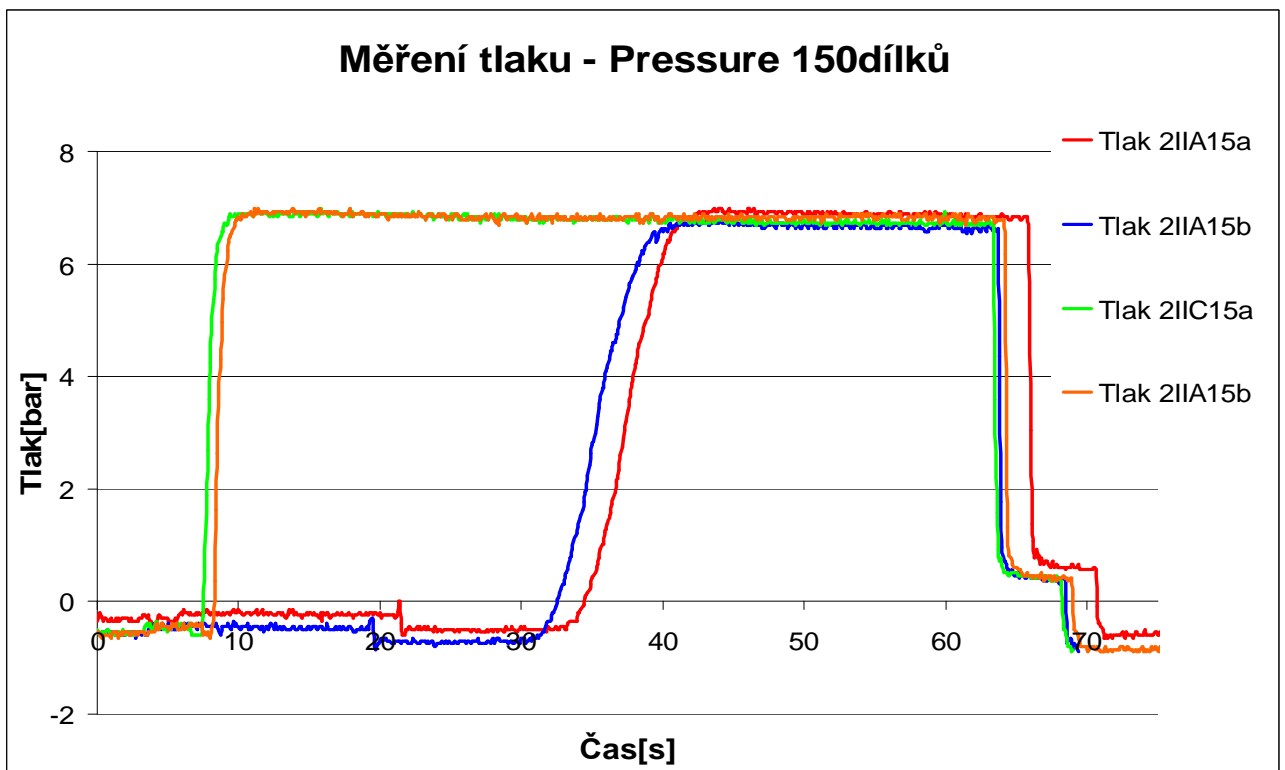
Graf P1.8 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIE30a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 450dílků a Pressure 300dílků.



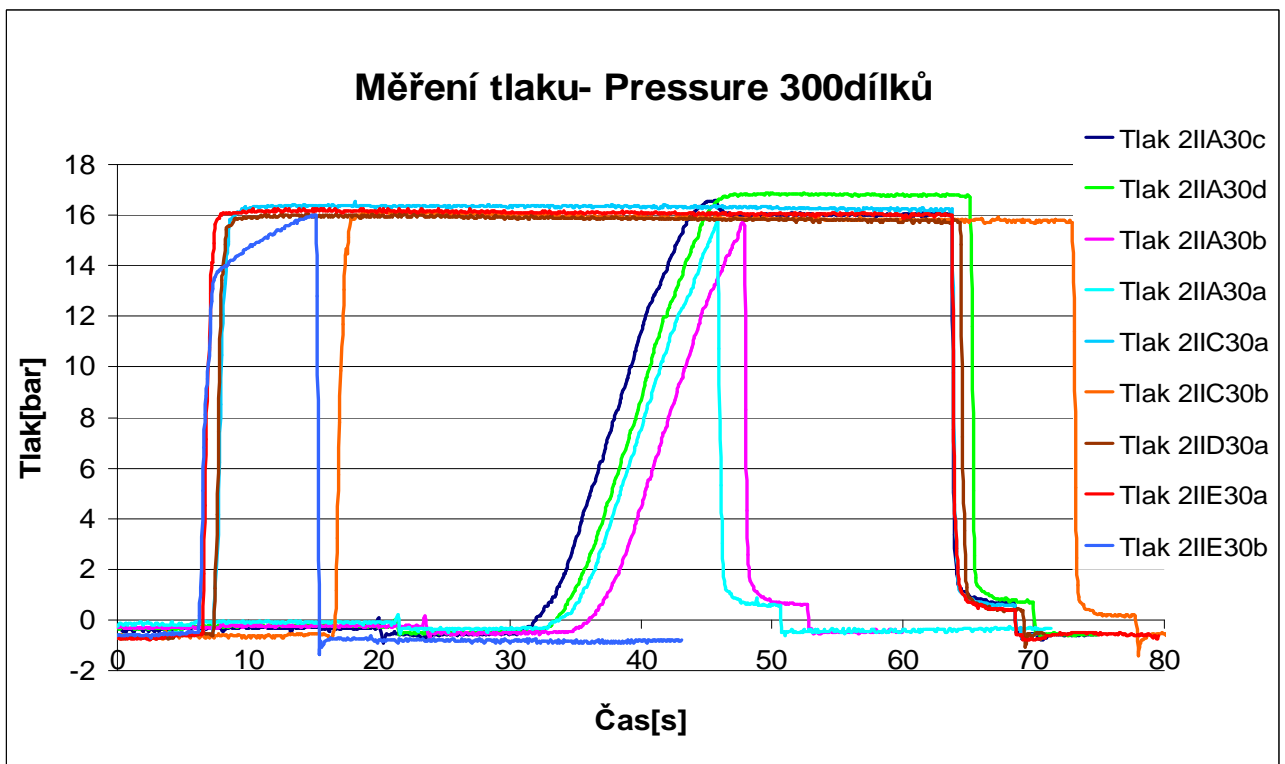
Graf P1.9 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IID30a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 350dílků a Pressure 300dílků.



Graf P1.10 Záznam průběhu teplot a tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů 2IIE30b. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 450dílků a Pressure 300dílků.



Graf P1.11 Záznam průběhů tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů Pressure 150dílků.



Graf P1.12 Záznam průběhů tlaků naměřených při nastavení vstřikovacích parametrů Pressure 300dílků.

## Příloha 2

Čas 0.04s(00143)



Čas 7.00s(00350)



Čas 11.52s (00463)



Čas 20.04s (00676)



Čas 24.20s (00780)



Čas 27.00s (00850)



Čas 28.76s (00894)



Čas 29.56s (00914)

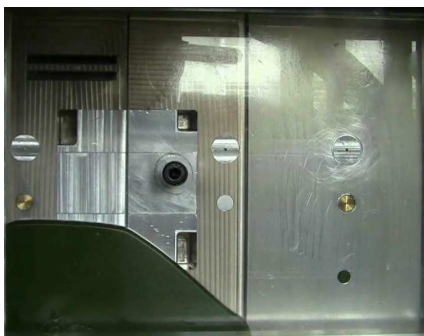


Obr. P2.1 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIA30a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 300dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.

Čas 0.04s(10937)



Čas 7.00s(11144)



Čas 11.52s (11257)



Čas 20.04s (11470)



Čas 24.20s (11574)



Čas 27.00s (11644)



Čas 28.76s (11688)

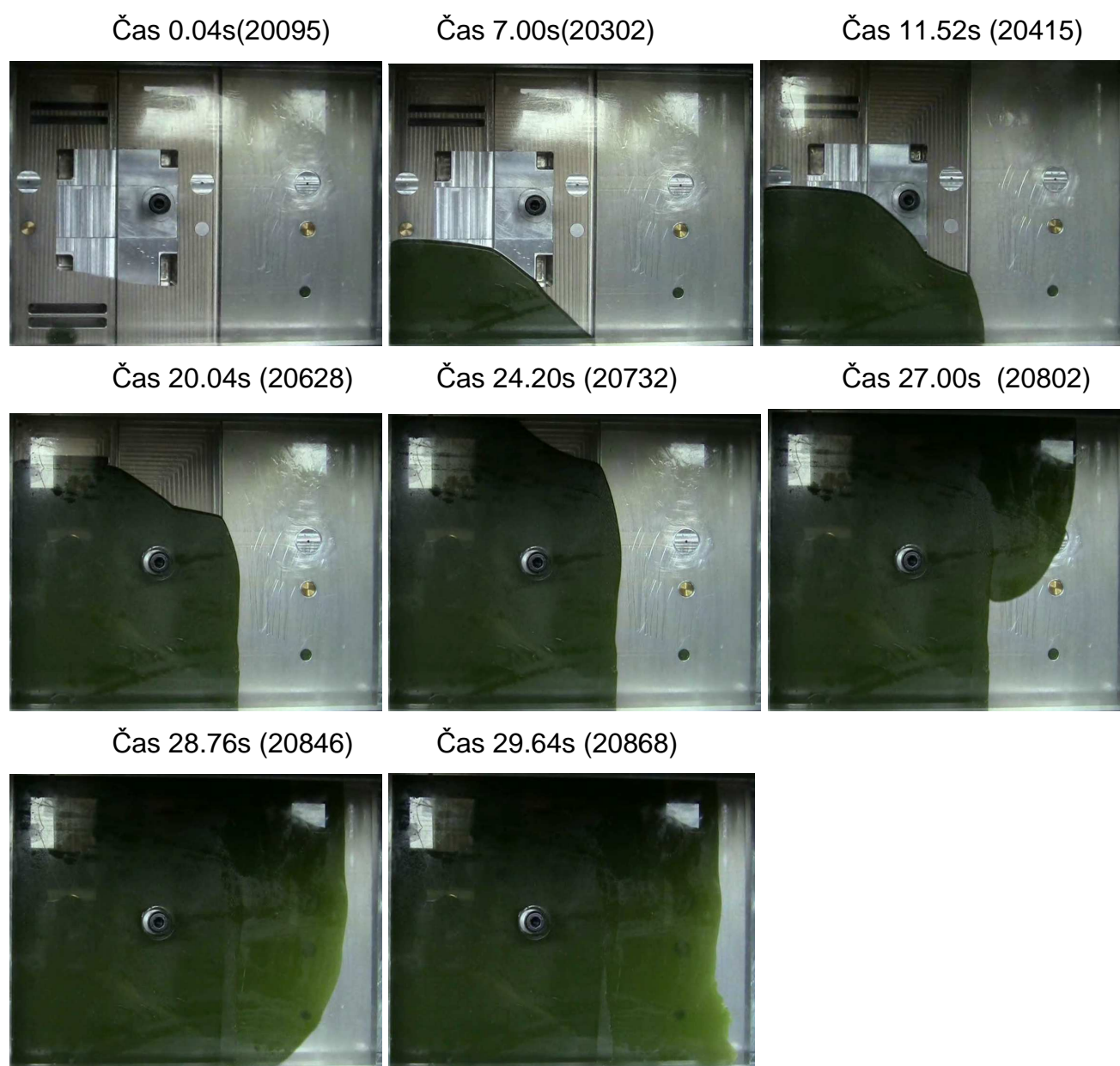


Čas 29.80s (11714)



Obr. P2.2 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIA30b. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 300dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.





Obr. P2.3 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIA30c. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 300dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.



Obr. P2.4 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIA30d. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 300dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.



Čas 0.04s(40226)



Čas 7.00s(40433)



Čas 11.52s (40546)



Čas 20.04s (40759)



Čas 24.20s (40863)



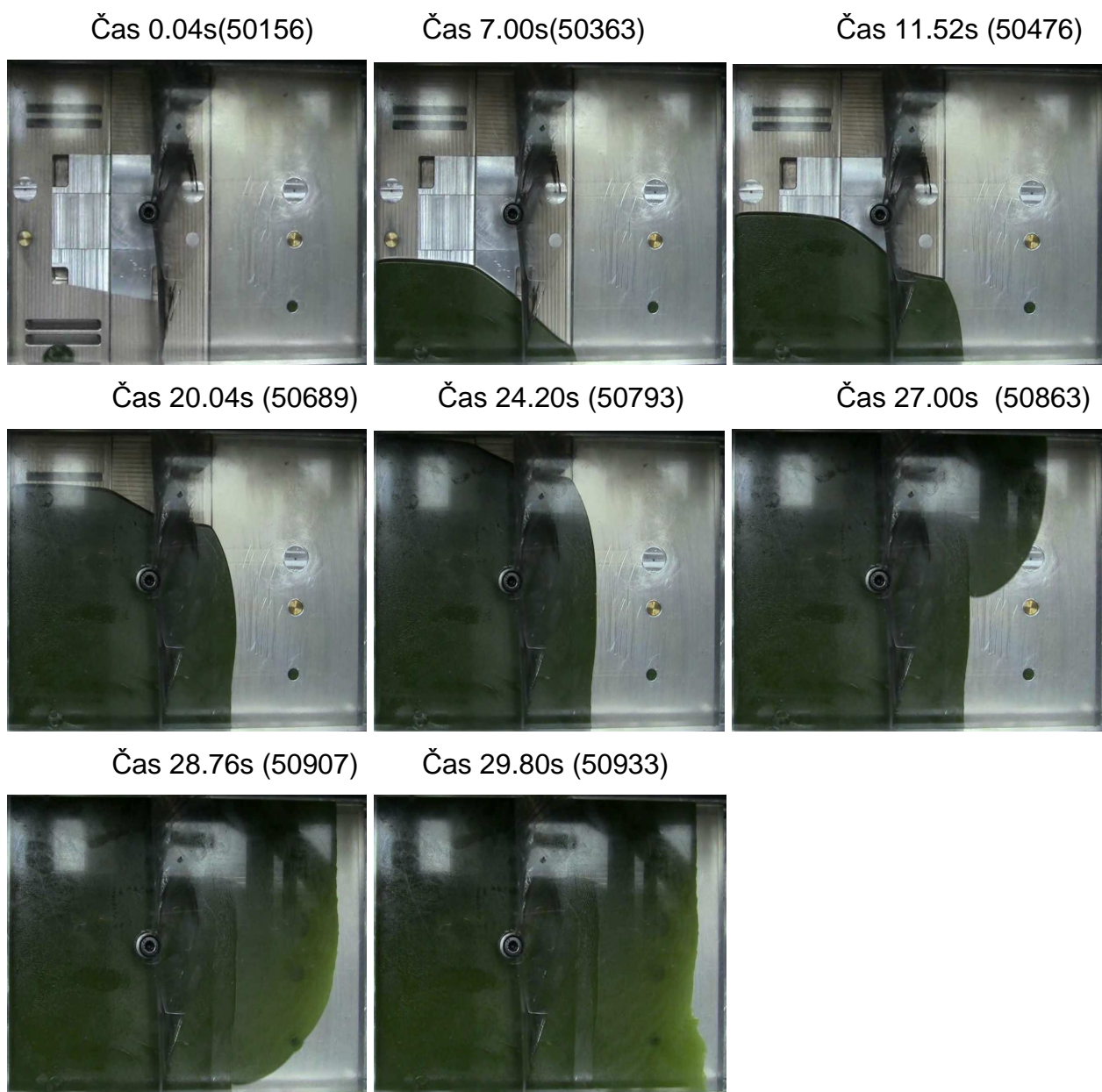
Čas 27.00s (40933)



Čas 28.76s (40977)



Obr. P2.5 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIA80a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 800dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.



Obr. P2.6 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIA15a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 150dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.

Čas 0.04s(60082)



Čas 7.00s(60289)



Čas 11.52s (60402)



Čas 20.04s (60615)



Čas 24.20s (60719)



Čas 27.00s (60789)



Čas 28.76s (60833)



Čas 29.64s (60855)



Obr. P2.7 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIA15b. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 150dílků a Pressure 150dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.



Čas 0.04s(70091)



Čas 0.60s(70138)



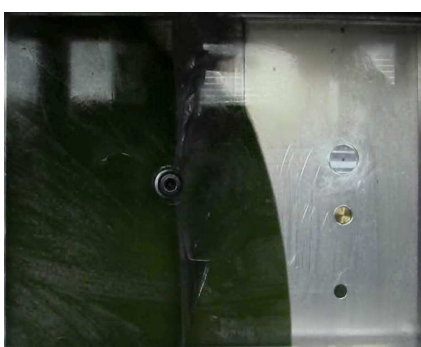
Čas 0.96s (70147)



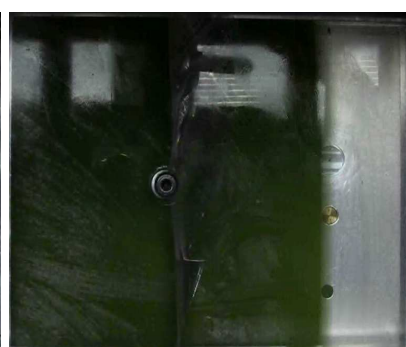
Čas 1.44s (70159)



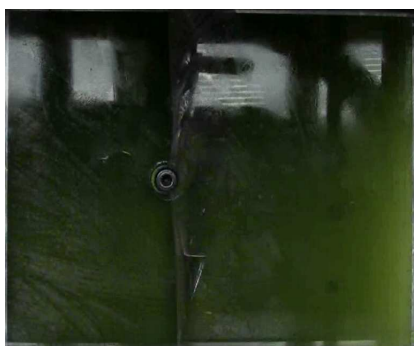
Čas 1.76s (70167)



Čas 2.00s (70173)



Čas 2.24s (70179)



Obr. P2.8 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIC30a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 300dílků a Pressure 300dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.

Čas 0.04s(80316)



Čas 0.60s(80363)



Čas 0.96s (80372)



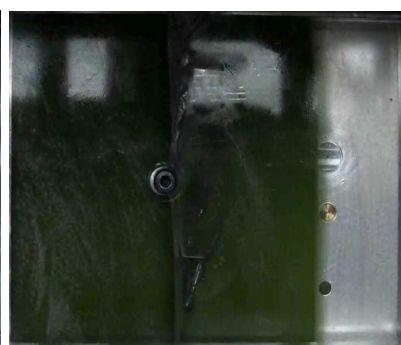
Čas 1.44s (80384)



Čas 1.76s (80392)



Čas 2.00s (80398)



Čas 2.24s (80404)



Obr. P2.9 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIC30b. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 300dílků a Pressure 300dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.



Obr. P2.10 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIC15a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 300dílků a Pressure 150dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.





Obr. P2.11 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIC15b. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 300dílků a Pressure 150dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.



Obr. P2.12 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIB32a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 250dílků a Pressure 320dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.



Čas 0.04s(140072)



Čas 0.92s(140127)



Čas 1.72s (140147)



Čas 2.40s(140164)



Čas 2.96s(140178)



Čas 3.32s (140187)



Čas 3.52s(140192)



Čas 3.68s(140196)



Obr. P2.13 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIB32b. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 250dílků a Pressure 320dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.

Čas 0.04s(160096)



Čas 0.40s(160139)



Čas 0.96s(160146)



Čas 1.16s(160153)



Čas 1.36s(160158)



Čas 1.56s (160163)



Čas 1.72s (160167)



Obr. P2.14 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IID30a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 350dílků a Pressure 300dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.

Čas 0.04s(170090)



Čas 0.40s(170132)



Čas 0.60s(170137)



Čas 0.84s(170143)



Čas 1.00s(170147)



Čas 1.16s(170151)

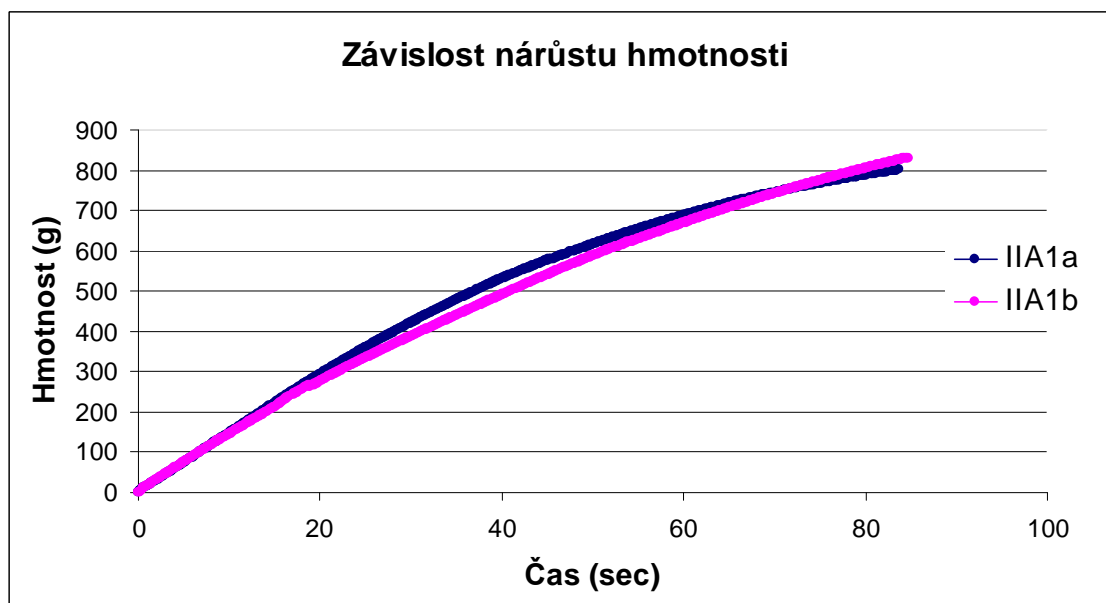


Čas 1.28s(170154)

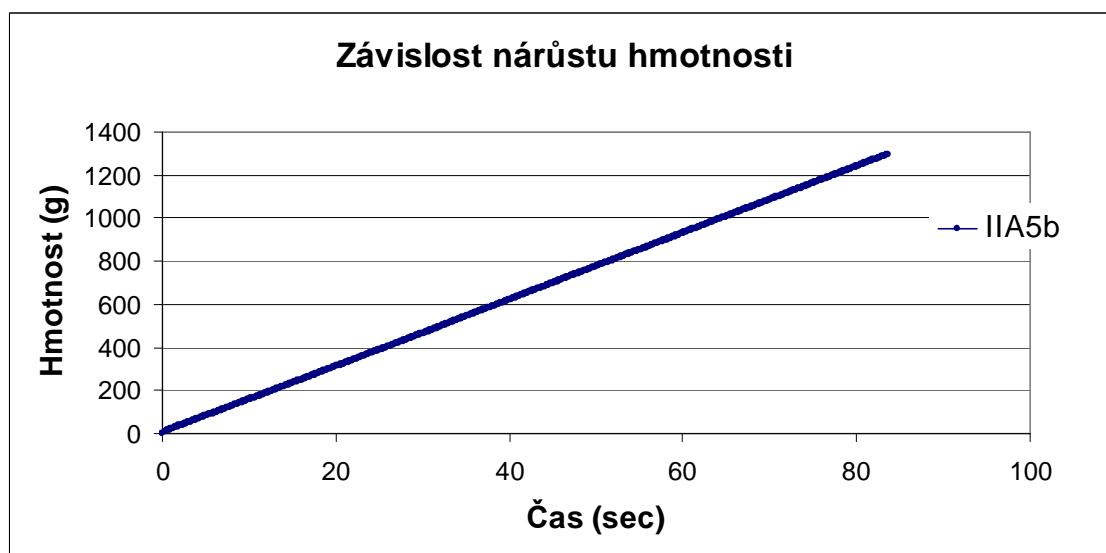


Obr. P2.15 Průběh zaplňování dutiny testovací formy II ve zvolených časových okamžicích při nastavení 2IIE30a. Nastavení vstřikovacích parametrů: Flow 450dílků a Pressure 300dílků. Čísla v závorce mají informativní účel a udávají číslo framu ze záznamu.

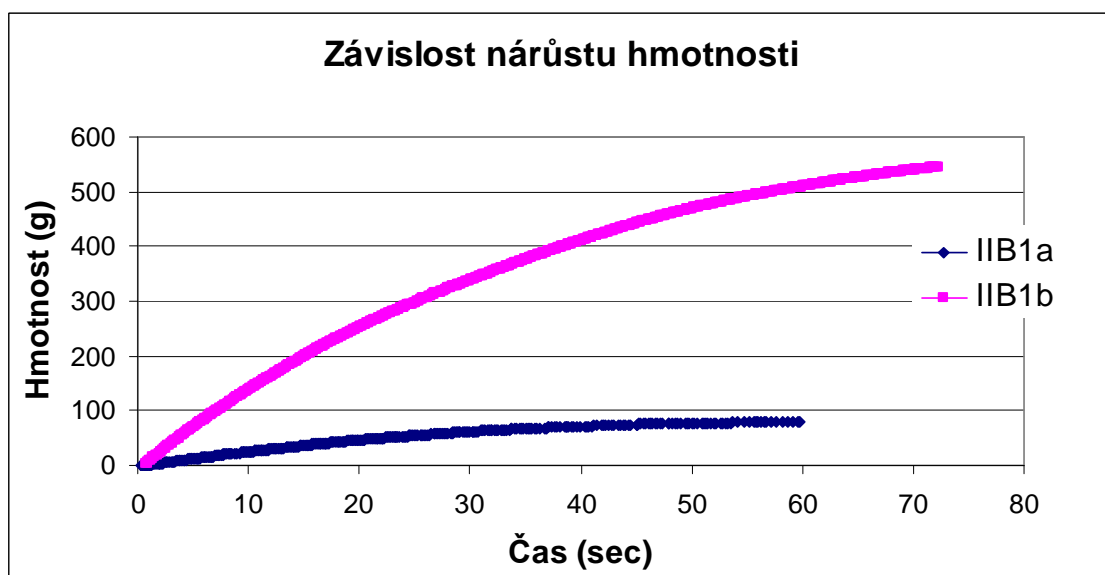
### Příloha 3



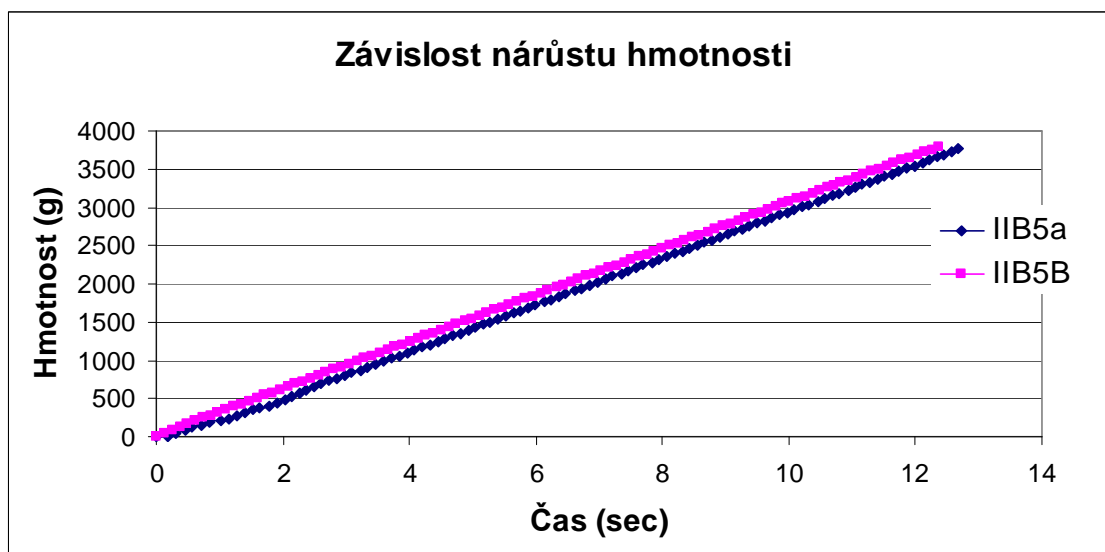
Graf P3.1 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIA1. Provedeny dvě opakovaná měření při nastavení FLOW – 150dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



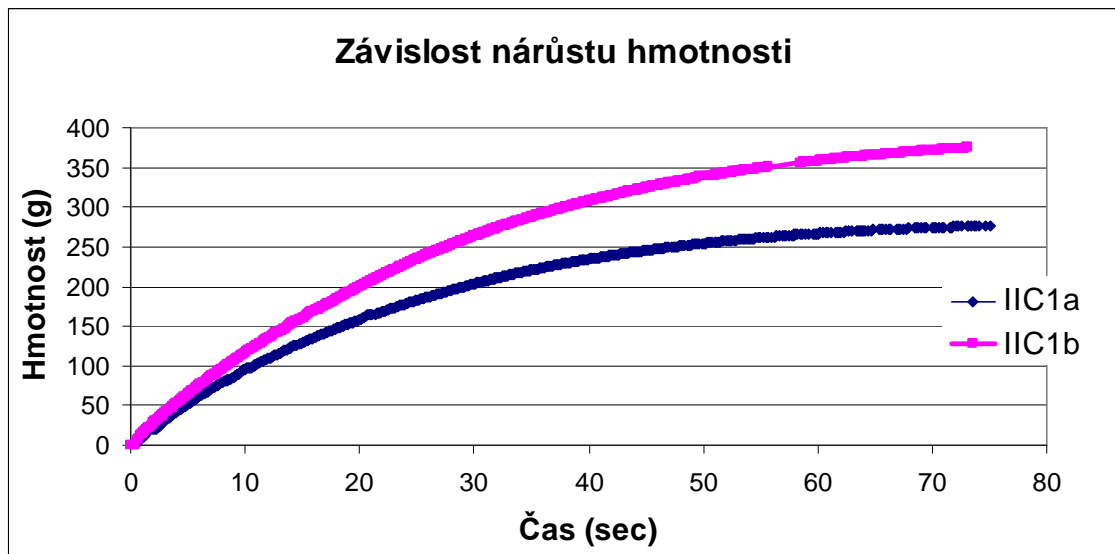
Graf P3.2 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIA5. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 150dílků, PRESSURE – 500dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



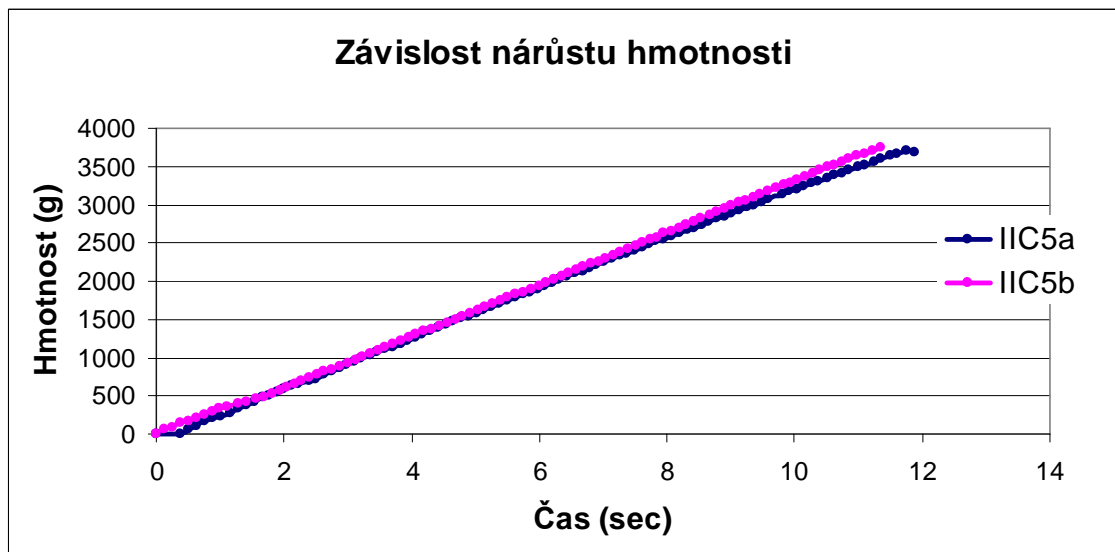
Graf P3.3 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIB1. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 300dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



Graf P3.4 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIB5. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 300dílků, PRESSURE – 500dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C

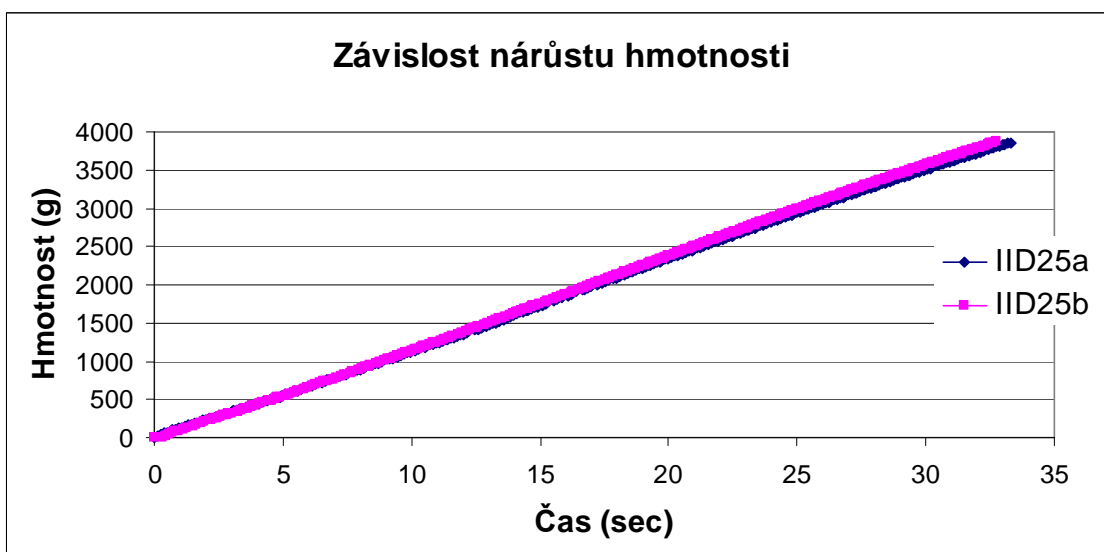


Graf P3.5 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIC1. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 450dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

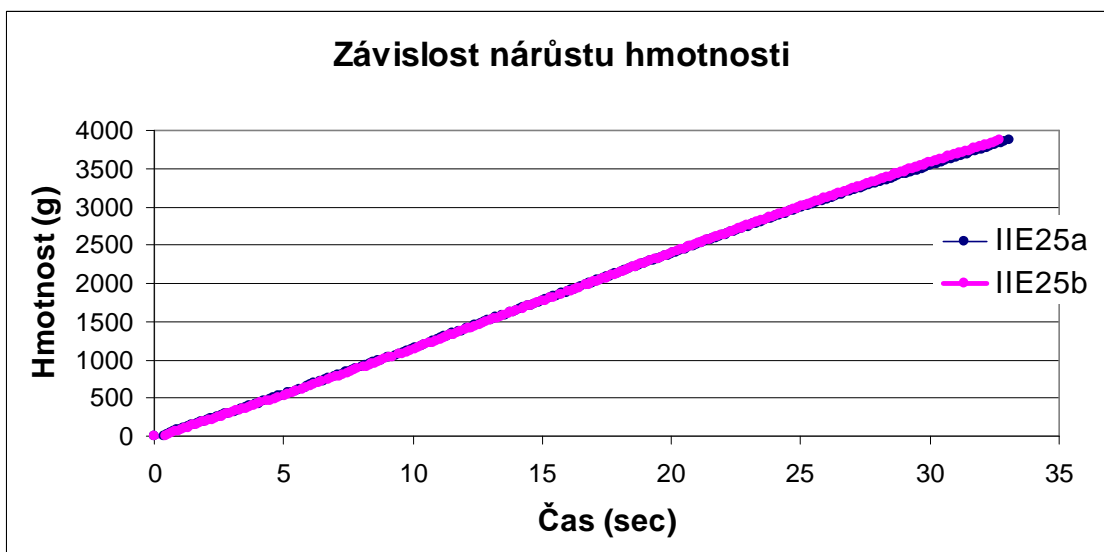


Graf P3.6 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIC5. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 450dílků, PRESSURE – 500dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

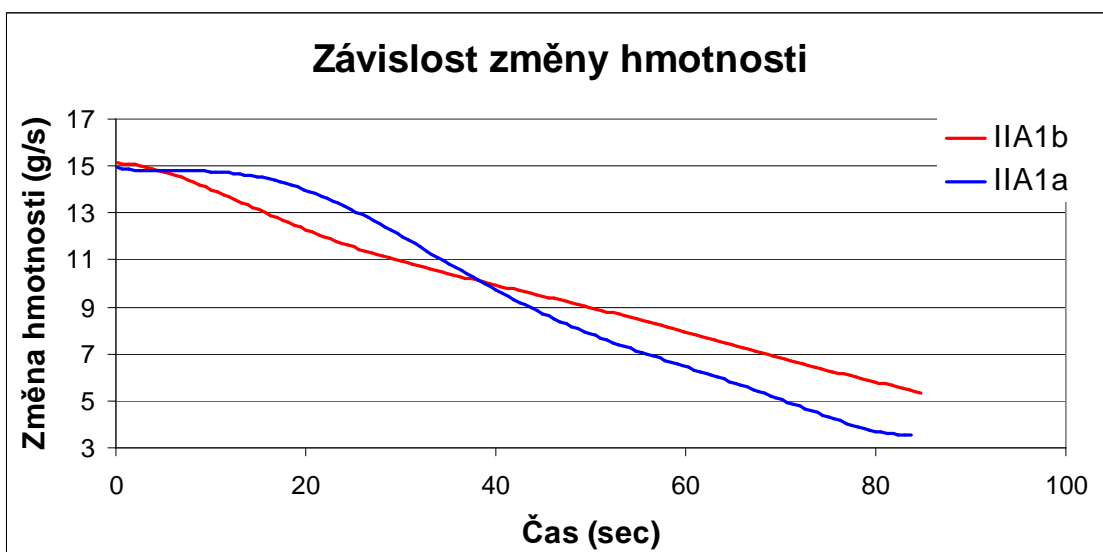




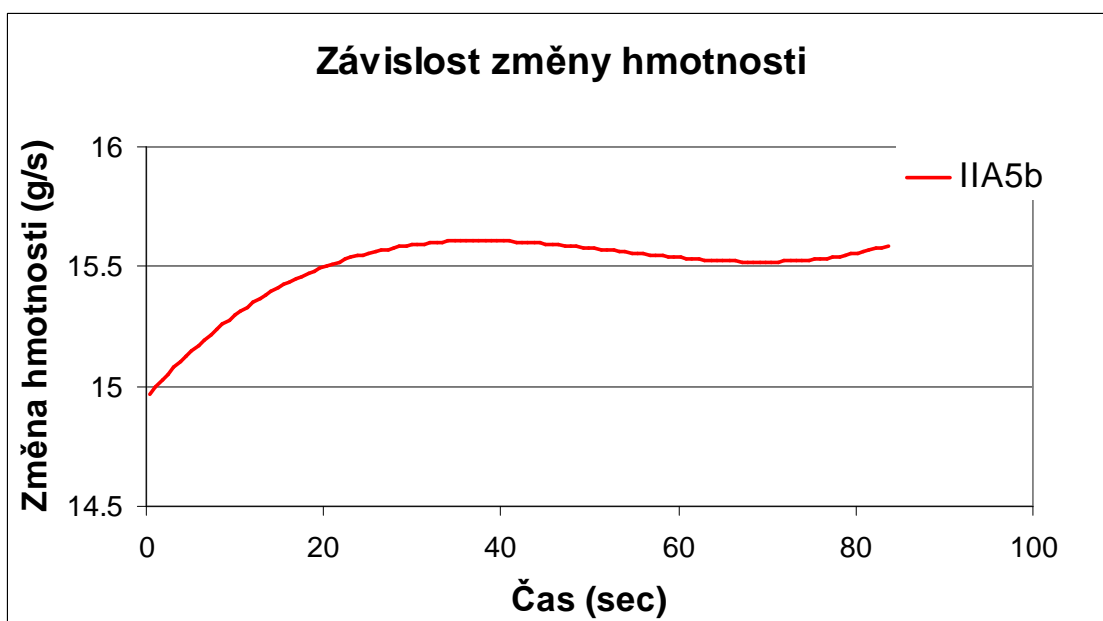
Graf P3.7 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IID25. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 300dílků, PRESSURE – 250dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



Graf P3.8 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIE25. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 450dílků, PRESSURE – 250dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

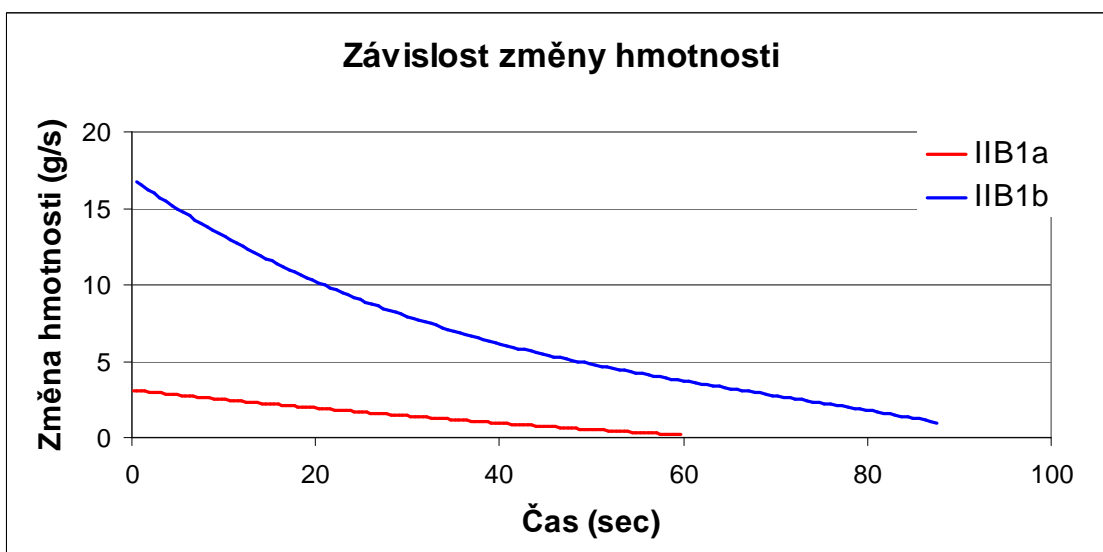


Graf P3.9 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIA1. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 150dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

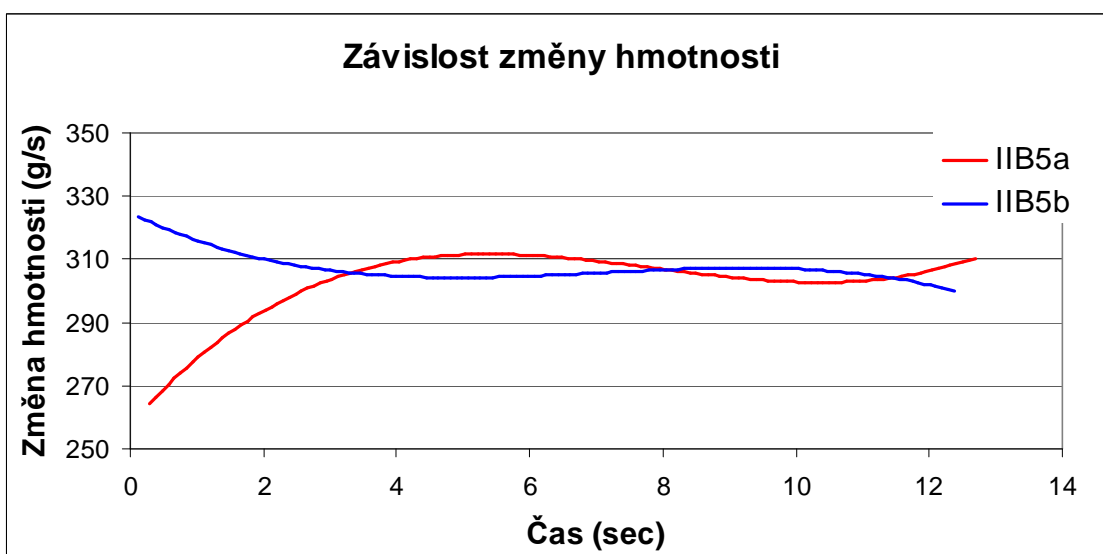


Graf P3.10 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIA5. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 150dílků, PRESSURE – 500dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

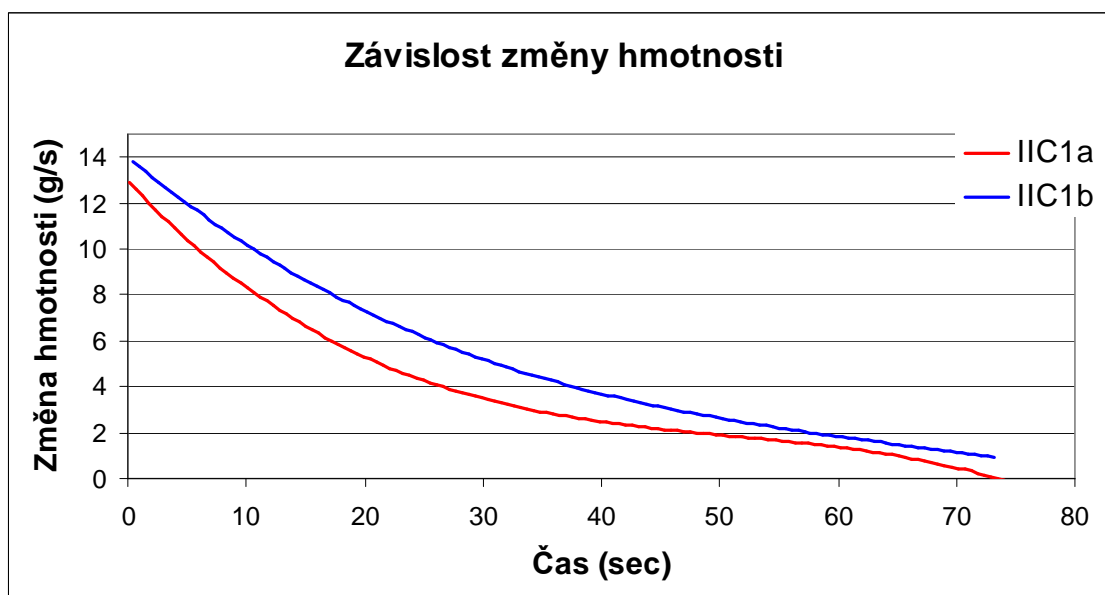




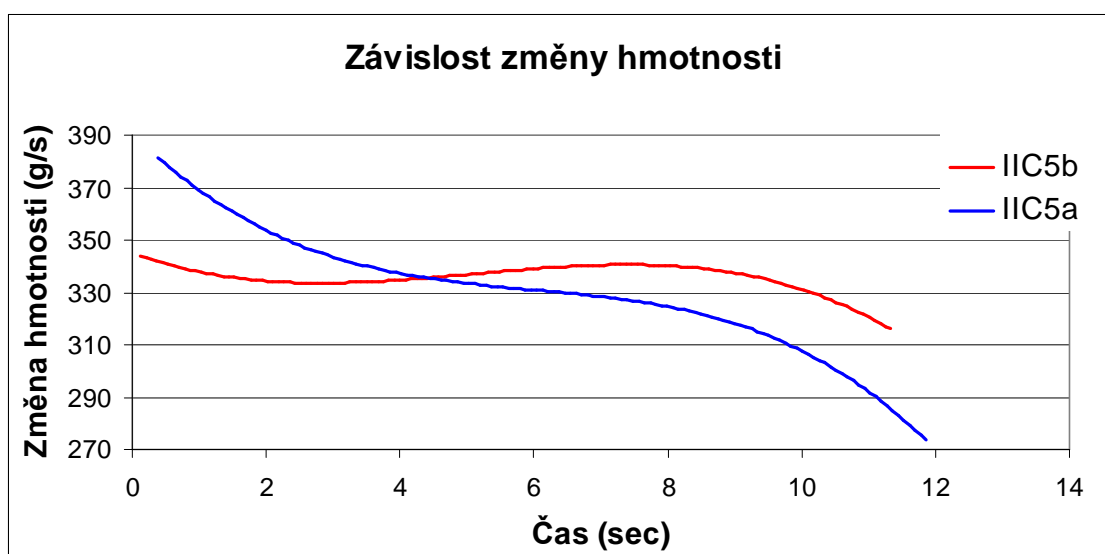
Graf P3.11 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIB1. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 300dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



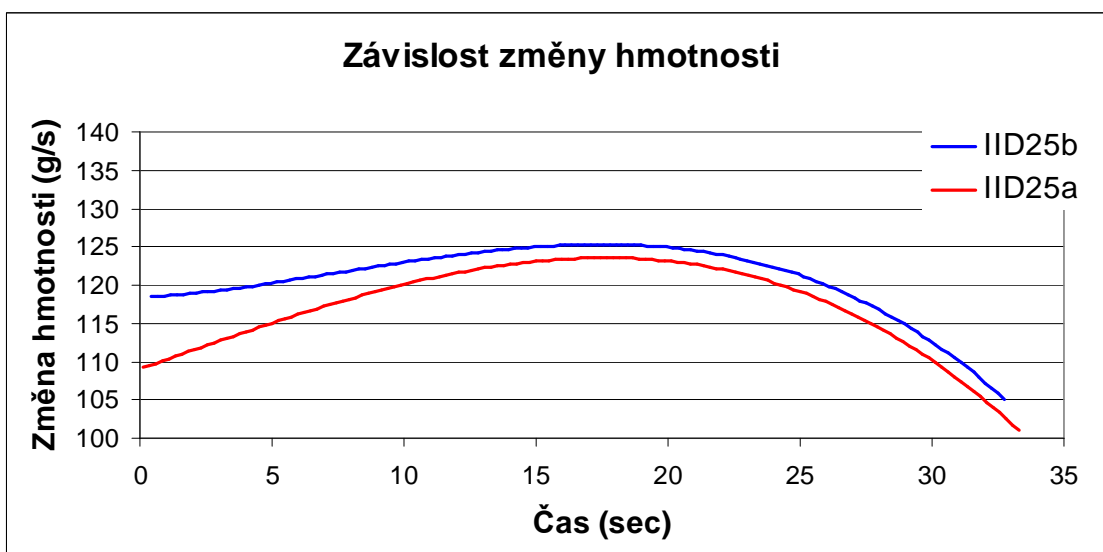
Graf P3.12 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIB5. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 300dílků, PRESSURE – 500dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



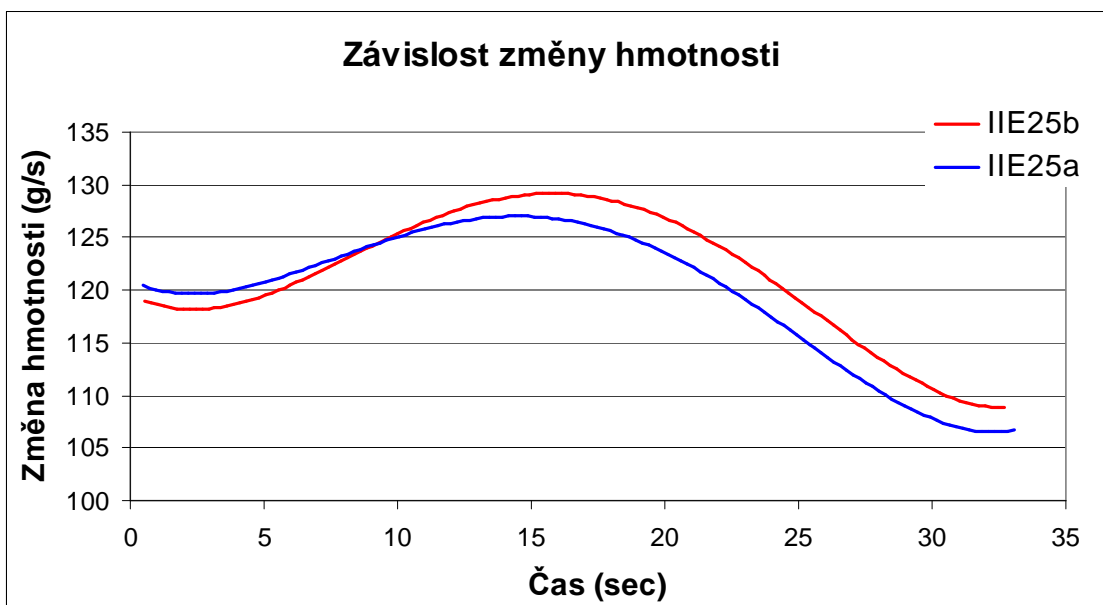
Graf P3.13 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIC1. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 450dílků, PRESSURE – 100dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



Graf P3.14 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIC5. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 450dílků, PRESSURE – 500dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



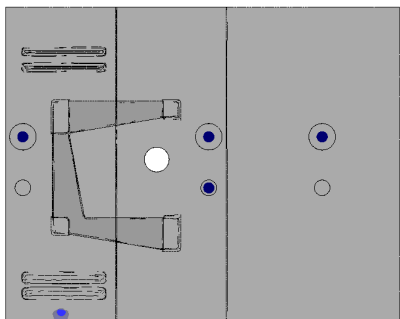
Graf P3.15 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IID25. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 300dílků, PRESSURE – 250dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.



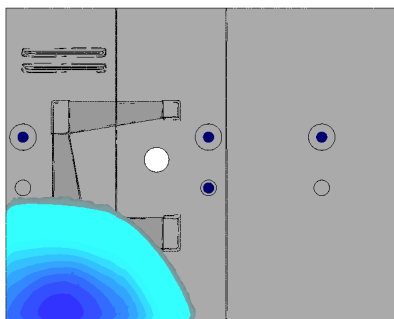
Graf P3.16 Závislost nárůstu hmotnosti voskové směsi během experimentálního měření pro nastavení vstřikovacích podmínek IIE25. Provedeny dvě stejná měření při nastavení FLOW – 450dílků, PRESSURE – 250dílků, teplota formy 30°C, nastavená teplota voskové směsi 64°C.

## Příloha 4

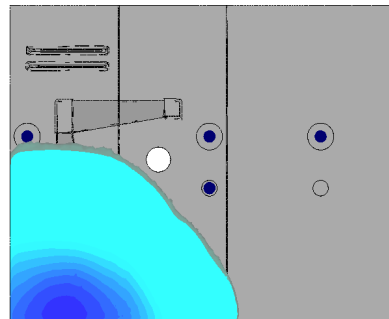
Čas 0.04s



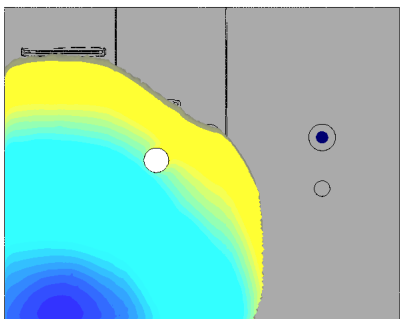
Čas 7.00s



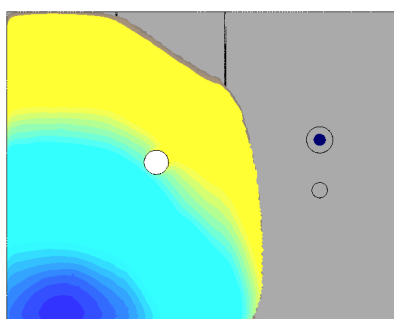
Čas 11.52s



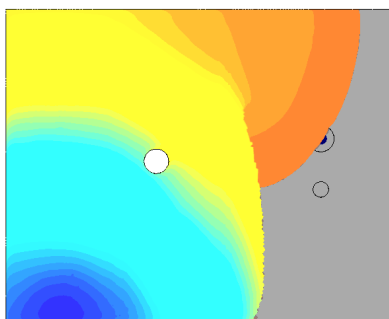
Čas 19.50s



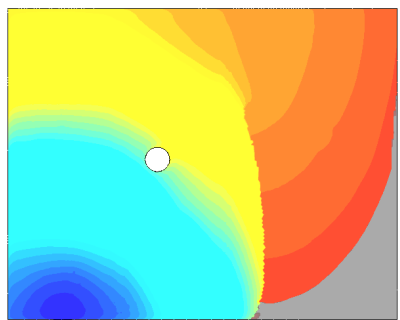
Čas 24.20s



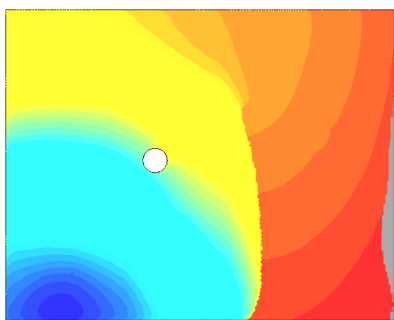
Čas 26.90s



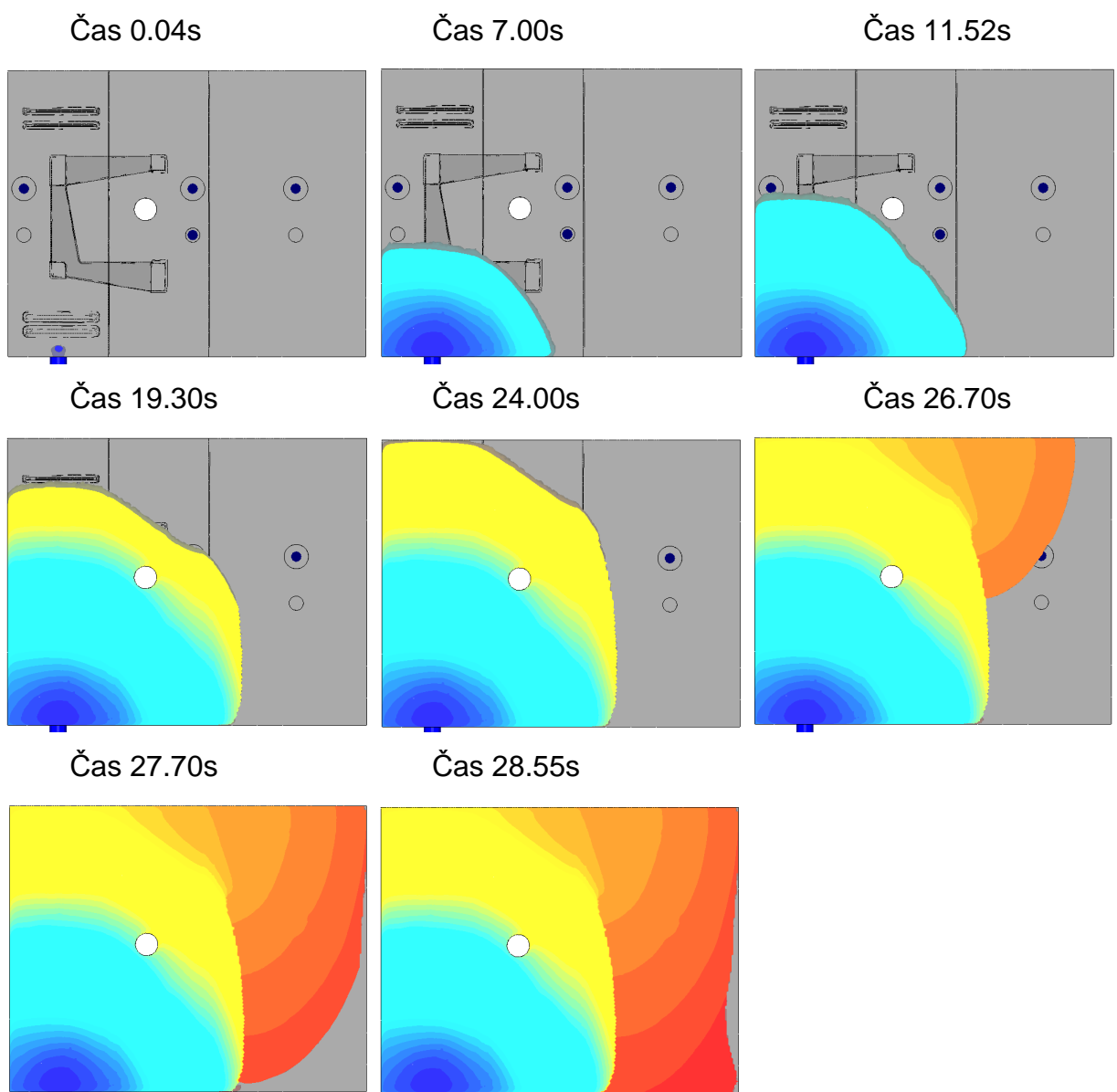
Čas 27.90s



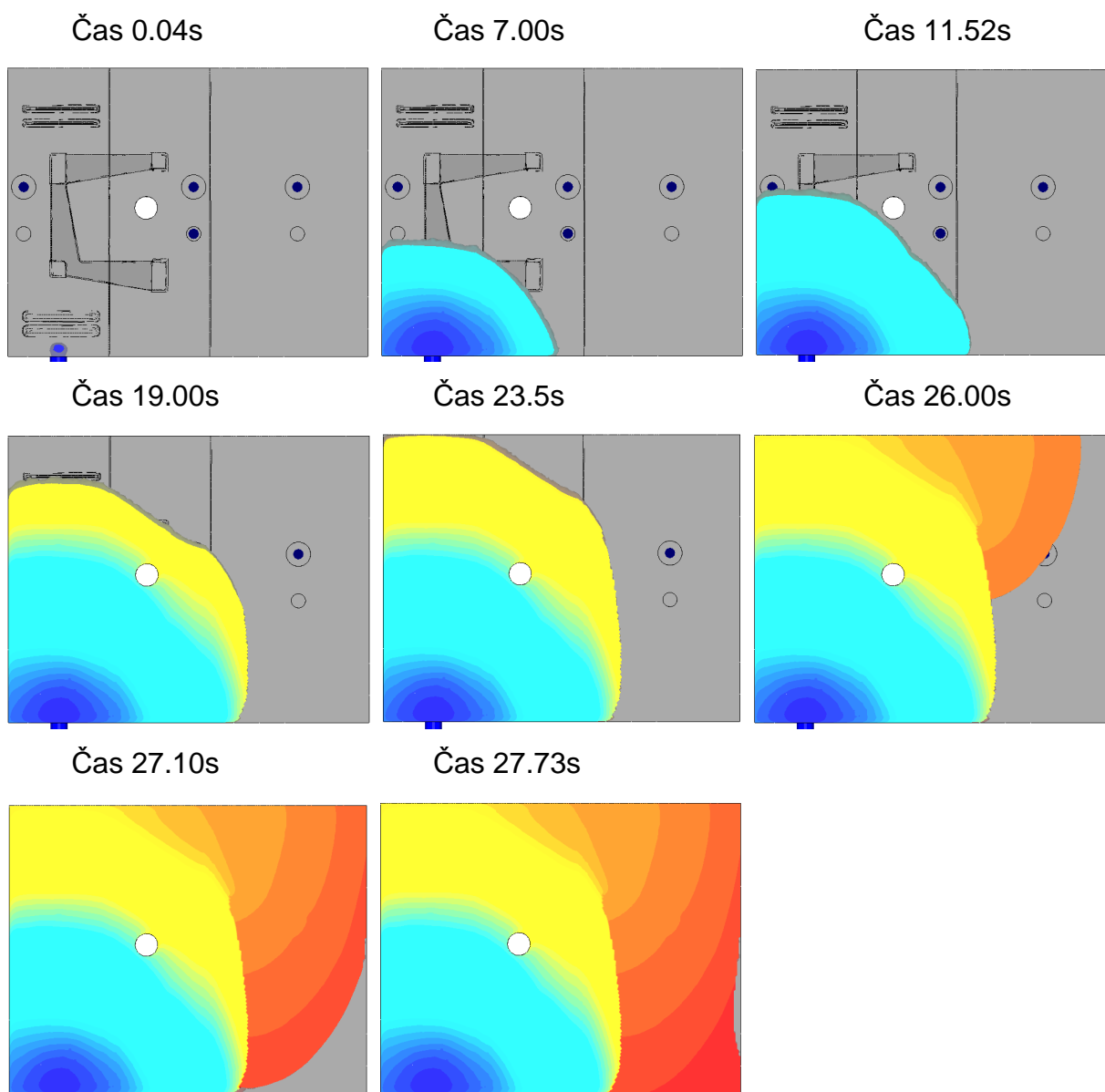
Čas 28.70s



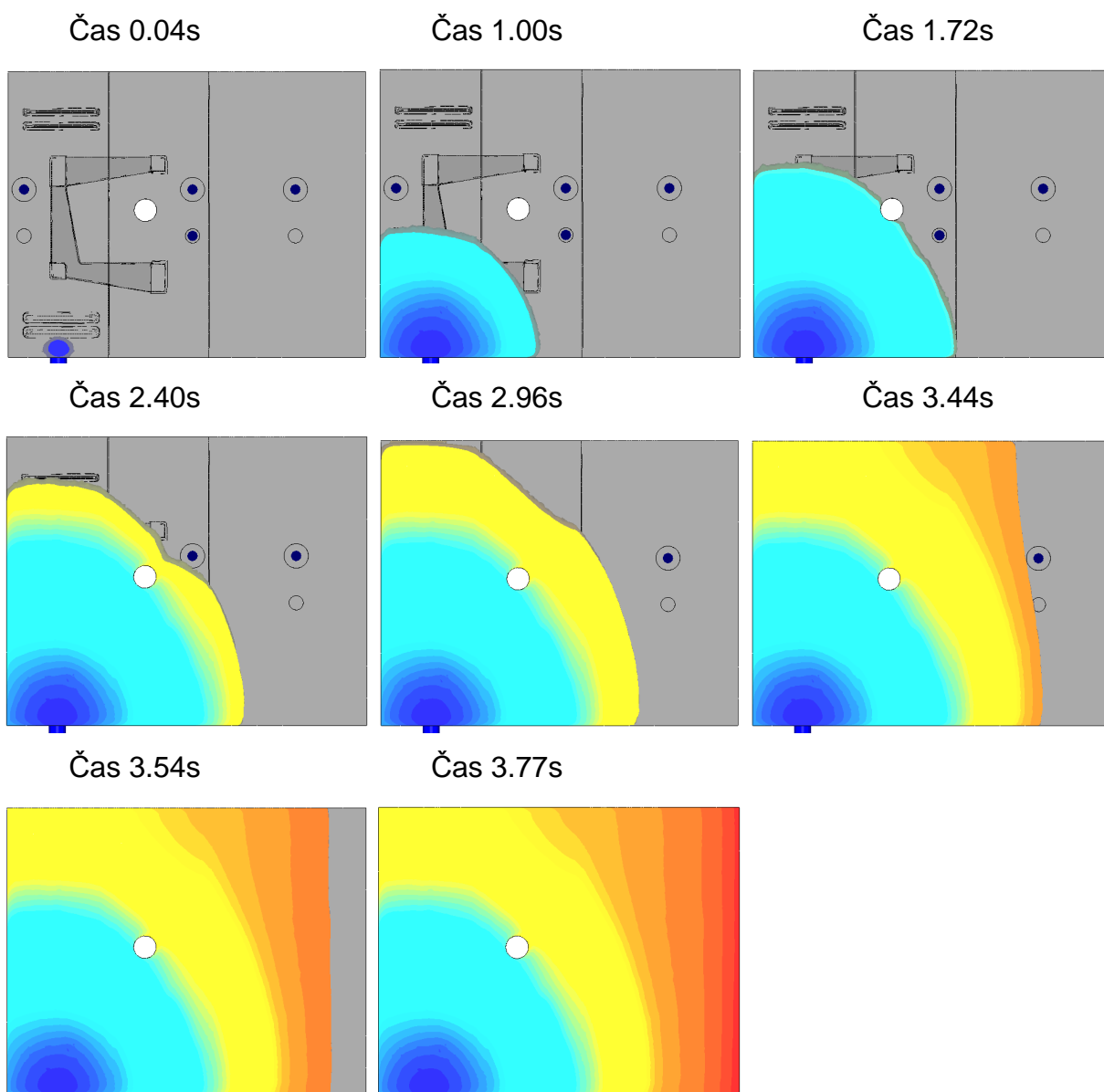
Obr. P4. 1 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIA15.



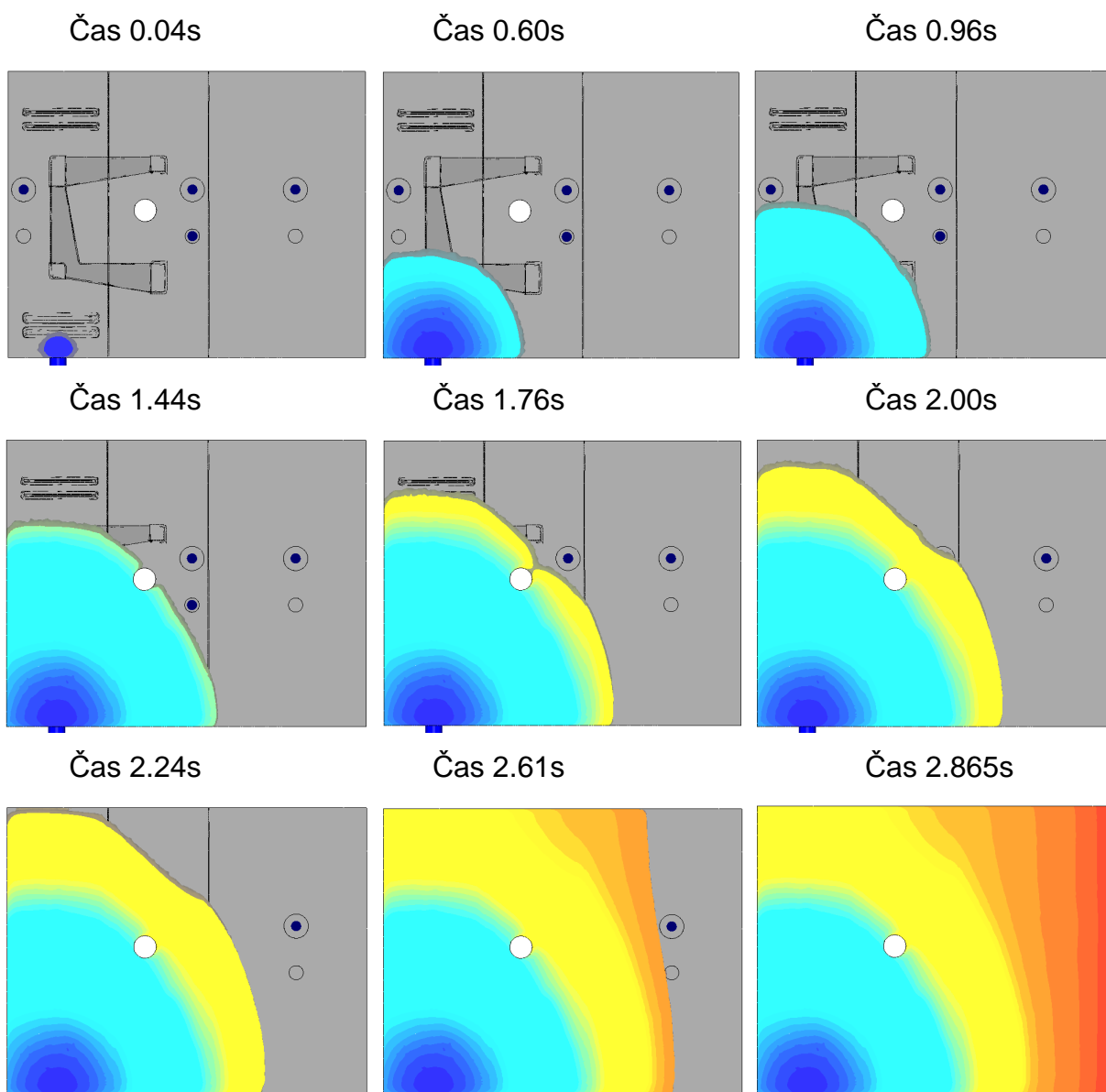
Obr. P4. 2 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIA30.



Obr. P4. 3 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIA80.

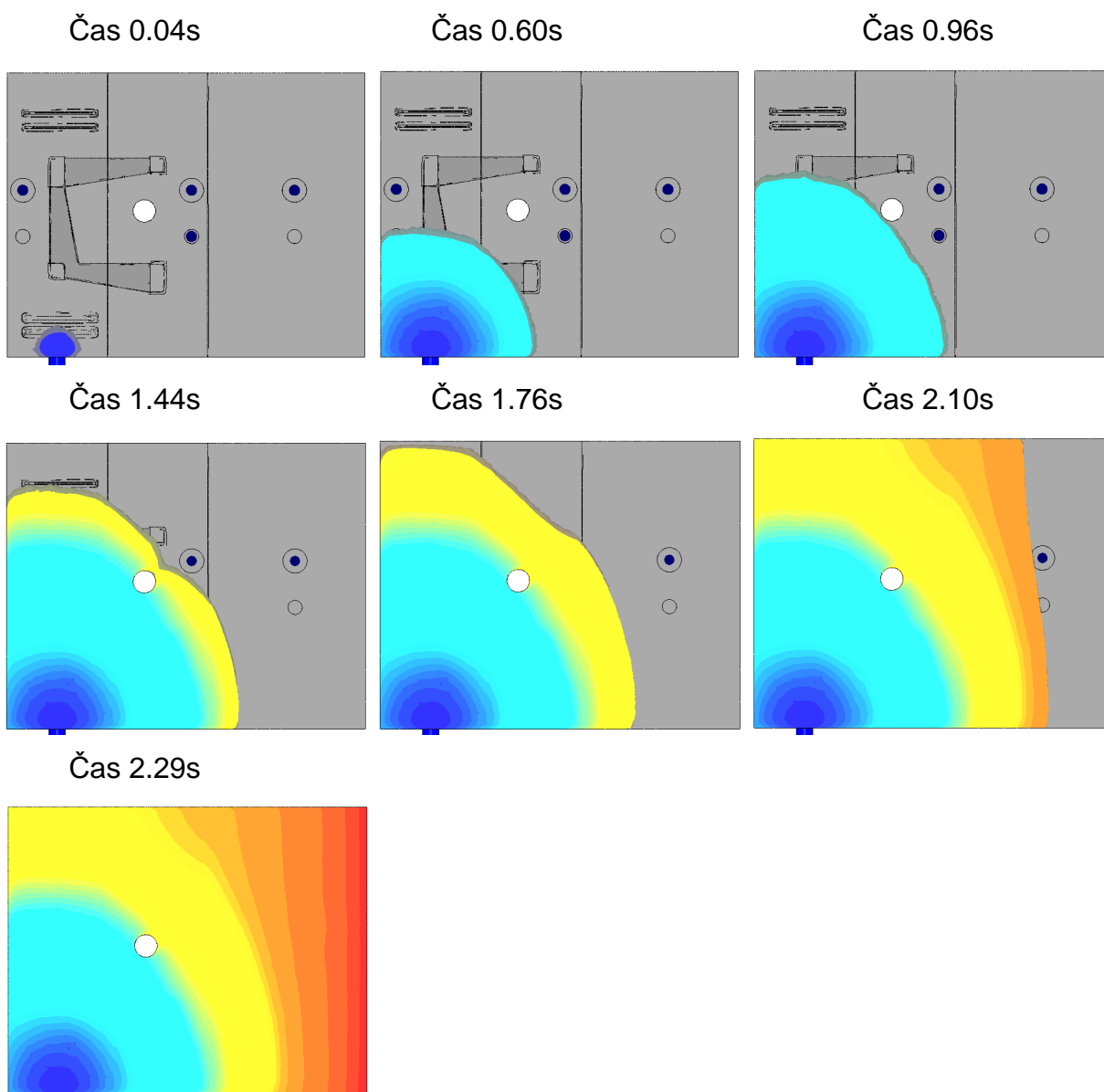


Obr. P4. 4 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIB32.

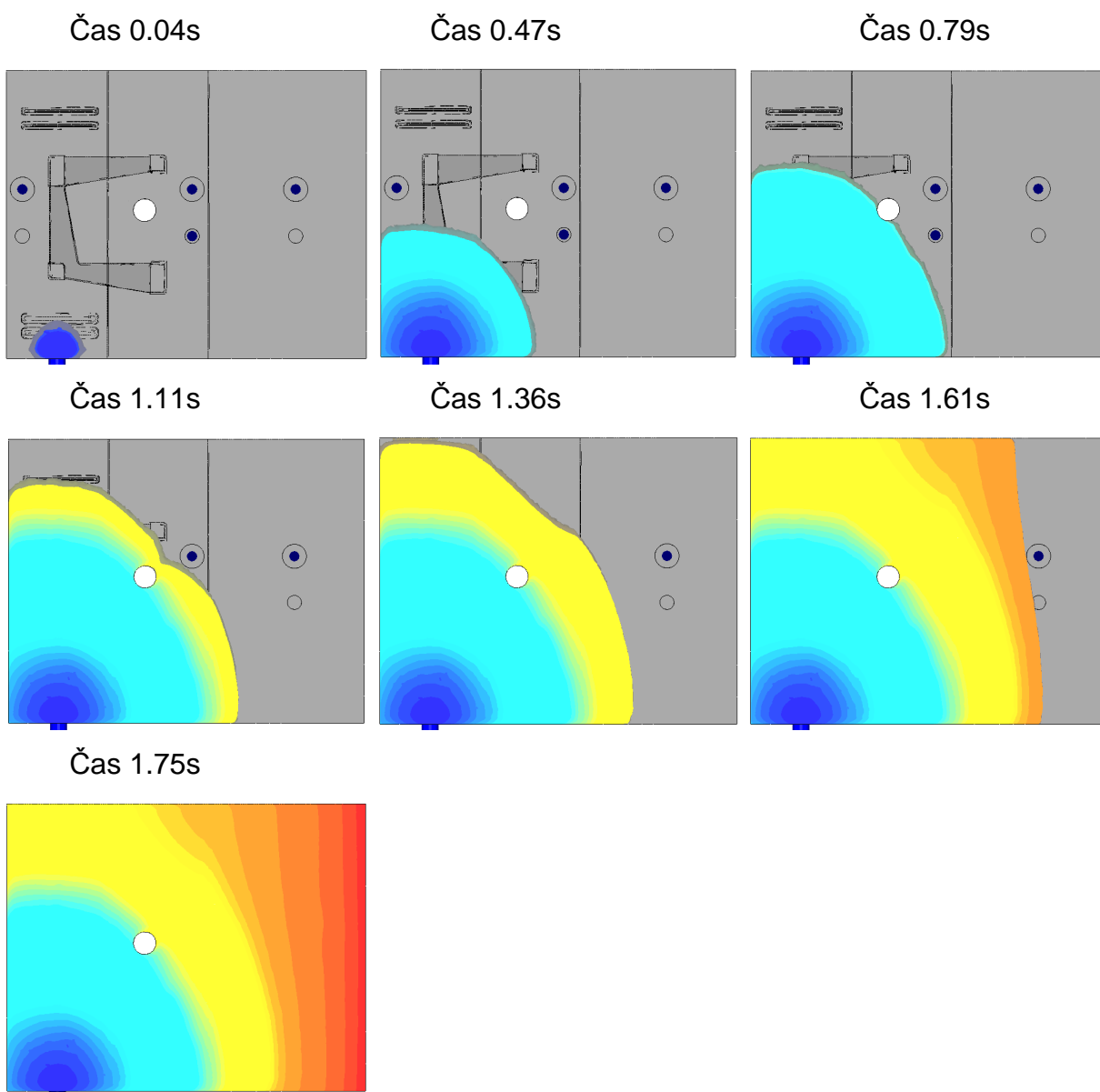


Obr. P4. 5 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIC15.

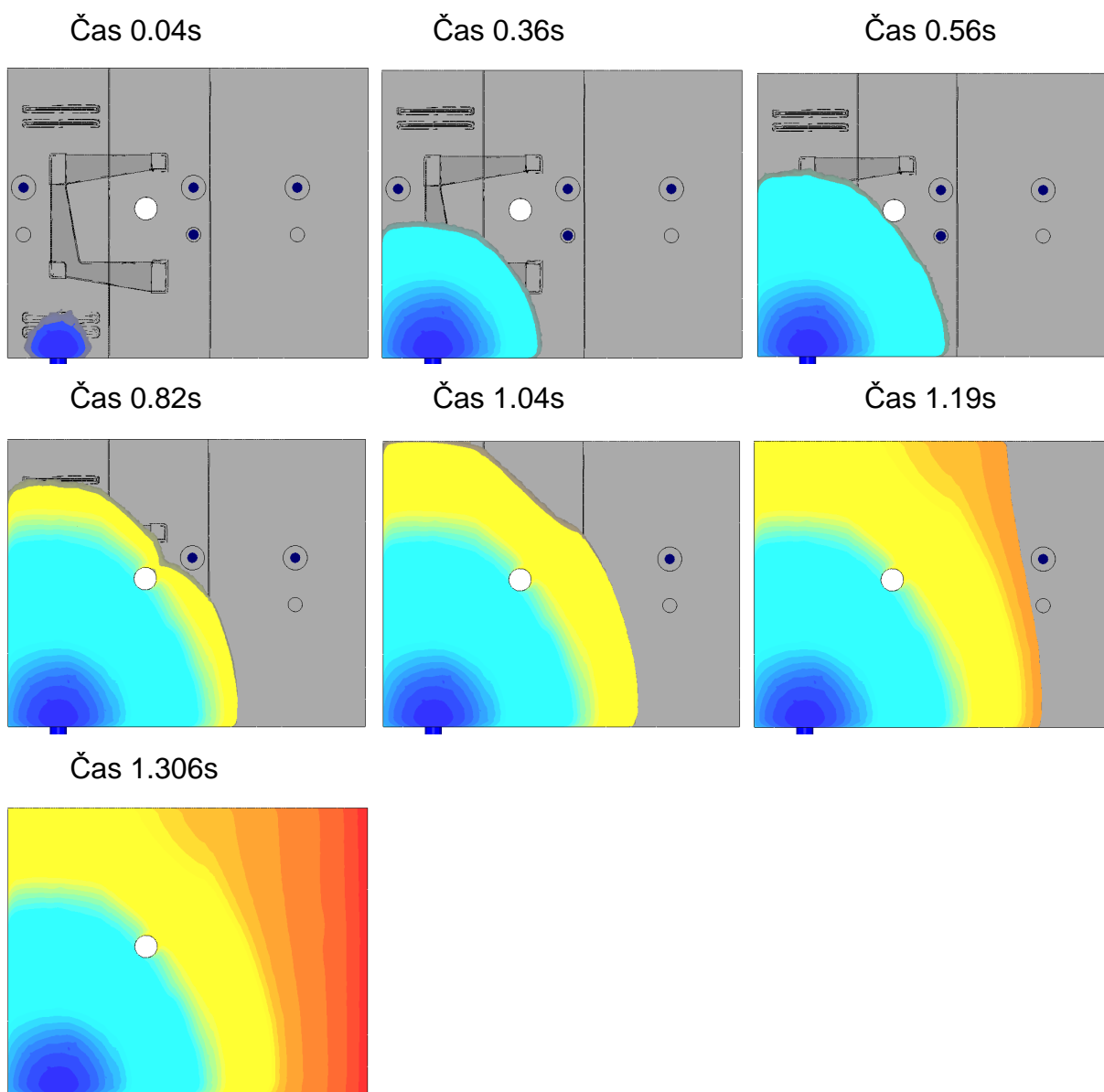




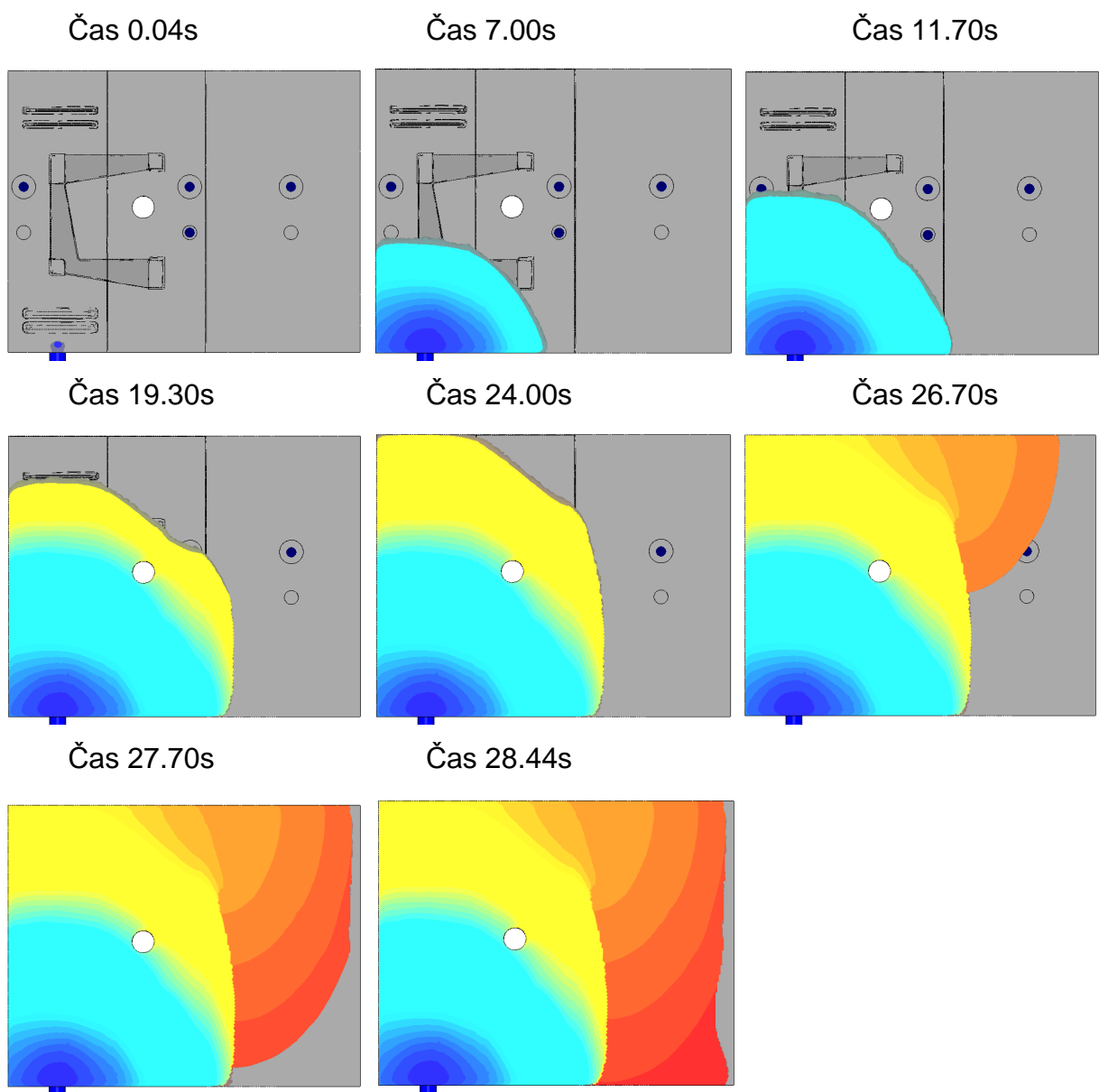
Obr. P4. 6 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIC30.



Obr. P4. 7 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IID30.



Obr. P4. 8 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIE30.



Obr. P4. 9 Průběh plnění numerické simulace pro nastavení 2IIA30 (Koeficient přestupu tepla 300 W/m<sup>2</sup>K).